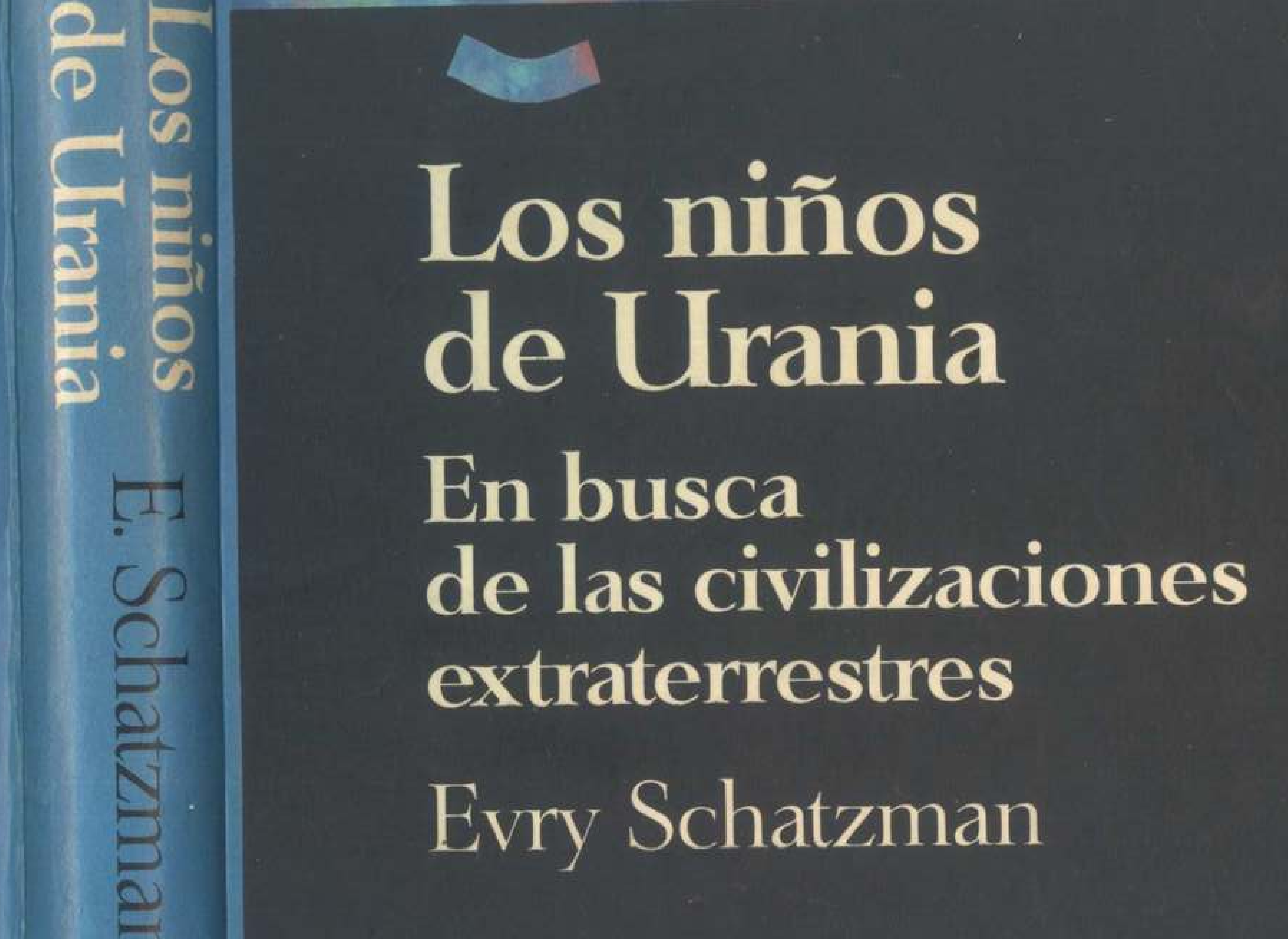


Los niños de Urania

En busca de las civilizaciones extraterrestres

Evry Schatzman

Biblioteca Científica Salvat

Los niños de Urania E. Schatzman 46

¿Estamos solos en el Universo? ¿Hay en otra parte de la Galaxia seres vivos pensantes? Durante mucho tiempo las respuestas a estas preguntas han sido el soporte argumental de libros y películas de ciencia ficción. Sin embargo, en la actualidad ocupan y preocupan a la mayoría de las disciplinas científicas. Hoy día, y gracias a la universidad de las leyes de la naturaleza y del progreso en las teorías de la evolución, todo parece indicar que el origen de la vida pensante no es un hecho excepcional y aislado.
Al mismo tiempo que la ciencia nos permite creer en la existencia de vecinos cósmicos, nuestras modernas técnicas están haciendo lo imposible para que entremos en contacto con ellos.
La lectura de este libro nos sitúa dentro del mundo de los extraterrestres y responde a muchas de las preguntas que diariamente nos hacemos.

Evry Schatzman es director del CNRS (Centro Nacional de Investigación Científica de París) y fundador de la escuela de astrofísica francesa. Sus numerosos e importantes trabajos científicos le han valido una gran reputación internacional. Además es miembro de la Academia Francesa de las Ciencias.

¿Estamos solos en el Universo? ¿Hay en otra parte de la Galaxia seres vivos pensantes? Durante mucho tiempo las respuestas a estas preguntas han sido el soporte argumental de libros y películas de ciencia ficción. Sin embargo, en la actualidad ocupan y preocupan a la mayoría de las disciplinas científicas. Hoy día, y gracias a la universidad de las leyes de la naturaleza y del progreso en las teorías de la evolución, todo parece indicar que el origen de la vida pensante no es un hecho excepcional y aislado.
Al mismo tiempo que la ciencia nos permite creer en la existencia de vecinos cósmicos, nuestras modernas técnicas están haciendo lo imposible para que entremos en contacto con ellos.
La lectura de este libro nos sitúa dentro del mundo de los extraterrestres y responde a muchas de las preguntas que diariamente nos hacemos.

Evry Schatzman es director del CNRS (Centro Nacional de Investigación Científica de París) y fundador de la escuela de astrofísica francesa. Sus numerosos e importantes trabajos científicos le han valido una gran reputación internacional. Además es miembro de la Academia Francesa de las Ciencias.

Los niños de Urania

E. Schatzman

46

Los niños de Urania

En busca de las civilizaciones extraterrestres

Evry Schatzman

Biblioteca Científica Salvat



Los niños de Urania

Biblioteca
Científica
Salvat

Los niños de Urania

En busca de las civilizaciones extraterrestres

Evry Schatzman

SALVAT

Versión española de la obra original francesa *Les enfants d'Uranie* publicada por Éditions Du Seuil de París

Traducción: Matoya Wulff
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8926-5 (Volumen 46)
Depósito Legal: B-12589-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a., Mayo 1994
Printed in Spain

ÍNDICE

Urania, una de las nueve musas de la astronomía.
Urania, del griego «ouranos», firmamento (1827).
Camille Flammarion designaba a los astrónomos,
enamorados del cielo,
por la expresión poética «los amantes de Urania».

INTRODUCCIÓN

Relámpagos en la superficie de Marte, enormes cilindros que se precipitan sobre la Tierra; pasan unas horas y la tapadera de uno de ellos se abre chirriando para dejar salir unas horribles criaturas y unas máquinas bélicas armadas de mortíferos rayos; la especie humana es transformada en ganado y cabrá esperar que las bacterias terrestres venzan a los marcianos. Ésta es la historia que cuenta H. G. Wells en *La guerra de los mundos*. La narración, presentada en forma de reportaje por Orson Welles y difundida una noche de 1940 por una emisora de radio de Nueva York, creó en la población tal pánico que todavía hoy es objeto de conversación.

Quizá *La guerra de los mundos* (1898) sea la primera novela en la que aparece una descripción —que pueda denominarse realista— de un contacto con extraterrestres. Este mismo realismo es el que se vuelve a encontrar en la emisión radiofónica de Orson Welles y el que explica el extraordinario impacto que alcanzó entre los oyentes neoyorquinos. Sin embargo, semejante impacto no se habría producido sin un fenómeno cultural latente, presente ya en un buen número de personas: el convencimiento de que existen civilizaciones extraterrestres y de que sus vanguardias pueden aparecer cualquier día sobre la Tierra.

Cuando H. G. Wells publicó *La guerra de los mundos*, no era nueva la idea de una civilización extraterrestre. La literatura ya había tratado la exploración de los mundos por un habitante de la Tierra (Kepler en *Somnium*, Cyrano de Bergerac en *Les États et Empires de la Lune*) y la observación de la humanidad por visitantes extraterrestres (*Micromégas* de Voltaire), pero ha sido preciso esperar al desarrollo de la ciencia-ficción para que se examinen, con

cierto carácter sistemático, hipótesis diversas sobre el comportamiento de los extraterrestres, desde la observación y examen a distancia hasta la tragedia del tipo de *La guerra de las galaxias*. Tal vez no sea lo más notable el que un gran número de autores hayan examinado, estudiado y sistematizado con gran riqueza de imaginación el comportamiento de civilizaciones extraterrestres, bien en la Tierra, bien en nuestra Galaxia, sino el que hayan admitido su existencia como algo cierto. En efecto, los razonamientos implícitos o explícitos se pueden reducir a las tres etapas siguientes:

1. Hay miles de millones o billones de estrellas en el cielo. Su presencia basta para admitir la existencia de un número muy grande de sistemas planetarios análogos al nuestro. En el momento actual carecemos de datos de observación que justifiquen dicha afirmación; esto se debe, en primer lugar, a las numerosas dificultades para observar a los compañeros oscuros de las estrellas. El descubrimiento de compañeros oscuros (1)* (una «enana marrón») para un número limitado de cuerpos celestes sugiere la existencia de sistemas planetarios cerca de algunas estrellas, pero evidentemente ello no nos dice nada todavía sobre su número. Sin embargo, existen muchas razones de tipo teórico que conducen, de modo lógico, a la realización de investigaciones con objeto de descubrir tales sistemas planetarios.

2. Los átomos y las moléculas que se encuentran en los demás astros son los mismos que conocemos en la Tierra. En resumen, esto significa la universalidad de las leyes de la naturaleza: las mismas causas producen los mismos efectos en todo el Universo. Este enunciado de orden general lleva a creer que, puesto que la vida apareció sobre la Tierra, también tiene que haber aparecido en cualquier planeta de la Galaxia que goce de las mismas condiciones físicas favorables que han reinado en la Tierra desde su formación. ¿Con qué contamos para defender esta idea? Desde las hipótesis de Oparin (1924) (2) y los primeros trabajos de Urey y Miller (1953) (3), los trabajos experimentales de laboratorio sobre la formación de las moléculas que sirven de base a los organismos vivientes han contribuido con aportaciones esenciales al problema, pero sin que

* Las notas a las que hacen referencia los números se encuentran al final del libro (pág. 201 y sigs.).

todavía sepamos describir el origen de la vida. La hipótesis según la cual la vida está presente a gran escala en el Universo no es más que una afirmación sin pruebas, rechazada, por otra parte, por biólogos como Jacques Monod (*Le Hasard et la Nécessité*, 1970) (4) o como Leonard Ornstein (*A Biologist Looks at the Numbers*, 1982) (5).

3. La evolución sobre la Tierra ha culminado en la especie humana y con la aparición de una civilización técnica, hoy día en rápida evolución. La presencia de la civilización humana como consecuencia de la evolución de las especies basta para admitir que, dado que sobre la Tierra han aparecido una o dos civilizaciones, existen innumerables astros de la Galaxia en los que también deben haber aparecido civilizaciones.

Esta serie de hipótesis y su consiguiente relación llevan a los grandes proyectos astronómicos de detección de inteligencia extraterrestre, presentes o latentes, y en todo caso impregnando la cultura actual, se encuentran en el origen de las descripciones de «contactos en la primera, segunda o tercera fase».

¿Existe la posibilidad de encontrar los orígenes de estas hipótesis, de su racionalidad o de su racionalización, de seguir el debate de ideas y de explicar la oposición en el seno de lo científico entre los que creen y los que no creen en ello? Tomando el título de una película que ha hecho correr a las multitudes y que ha engendrado la producción de millones de ejemplares de un muñeco célebre: ¿existe E.T.?

Esto es lo que nos proponemos examinar en este libro.

LO QUE MUEVE A CREER

El lobo se come al cordero y con el cordero *fabrica lobo*; el cordero come hierba y con la hierba *fabrica cordero*.

Esta comprobación elemental tiene una larga tradición: procede de Demócrito y Epicuro. Lucrecio (6) lo manifiesta de la manera siguiente: «En consecuencia, la naturaleza convierte en cuerpos vivientes los alimentos de todo tipo.»

Esta conversión constante de cuerpos vivientes en otros cuerpos vivientes, de formas y propiedades diversas, llevó a que los atomistas griegos imaginasen un principio común, un elemento constitutivo invisible cuya diferente organización produce los diferentes cuer-

pos vivientes. En su forma más antigua la teoría atómica no tiene más origen que éste. La idea de que la transformación de un ser en otro distinto sólo es posible porque están compuestos de las mismas piezas, si bien montadas de otra forma, ha recorrido los siglos y se halla en la base de las grandes teorías físicas modernas. Comprobar, como se hace todos los días examinando los datos proporcionados por los grandes aceleradores de partículas, que toda partícula libre, con la adecuada interacción, puede transformarse en otras partículas, lleva a suponer que poseen «un principio común, un elemento constitutivo invisible cuya diferente organización produce las diferentes partículas libres».

Para enunciar este principio físico ha bastado con reemplazar *cuerpos vivientes* por *partícula libre*. Si se quisiera continuar con la analogía, se reemplazaría teoría atómica por *gran unificación*. Aunque la analogía sea falsa, la parábola del lobo, del cordero y de la hierba puede servir para evocar en el espíritu del lector el admirable poder de raciocinio de los atomistas griegos y latinos.

No existe *un* león, existen *los* leones; no existe *un* hombre, *los* hombres son innumerables. Esta capacidad de la naturaleza para producir especies, es decir, para reproducir los mismos seres en gran número, aparece inmediatamente generalizada en Lucrecio: «El mismo principio nos persuade de que el cielo y la Tierra, el Sol, la Luna, el mar y todo aquello que vive, lejos de ser los únicos de su especie, existen por el contrario en número infinito...»

Esta generalización se vuelve a encontrar siglo tras siglo. En su versión actual, podríamos hablar del principio de universalidad de las leyes de la naturaleza, si bien este principio, en lugar de tratarse de una especulación metafísica, se basa en un conjunto de datos procedentes de la observación. Llevado a su extremo, el principio de universalidad de las leyes de la naturaleza conduce a afirmaciones que, en esencia, no son distintas de las que hacía Lucrecio:

«Por lo demás, todas las veces que una materia abundante está dispuesta, que un espacio la espera y que nada obstaculiza, es inevitable que las cosas tomen forma y se realicen. Y si por añadidura los gérmenes existen en tal cantidad que todo el tiempo de la existencia de los seres no bastase para contarlos; si subsisten la misma fuerza y la misma naturaleza para agruparlos en todo lugar y en el mismo orden que los átomos de nuestro mundo, es preciso admitir que otras regiones del espacio conocen su globo, sus razas de hombres y sus especies salvajes.»

Ahí está ya la noción de la pluralidad de los mundos habitados, basada, sin embargo, en una evidencia que no es más que evidencia de raciocinio y no evidencia de observación (y, con razón, hace dos mil años que permanecemos en el mismo sitio). Henos aquí, pues, en presencia de un razonamiento en tres etapas, dos de las cuales tienen su origen en la observación: la universalidad de las leyes de la naturaleza, la producción de los mismos seres o de los mismos objetos en un gran número de ejemplares, el carácter inevitable de la producción de globos y de especies vivientes semejantes a nuestro globo y a nuestras especies vivientes. En este punto surge una interrogación: ¿Existen motivaciones no racionales, de orden psicológico o social, que impulsen al salto de la segunda y de la tercera etapa?

DOS PALABRAS DE HISTORIA

Si volvemos a los orígenes, pronto nos damos cuenta de que la idea de la pluralidad de los mundos habitados probablemente no sea de origen racional. La madre de Epicuro ejercía la respetable profesión de hechicera (7). Epicuro nunca consiguió librarse de las supersticiones que habían rodeado su infancia. ¿No necesitó, tras haberse librado de los dioses, poblar de nuevo el cielo con extraterrestres? Volveremos más adelante a esta necesidad de poblar el cielo con potencias tutelares.

Hace mucho tiempo que el sistema de los atomistas con su pluralidad de mundos quedó eclipsado por el sistema más coherente y más completo de Aristóteles. La teoría del movimiento de Aristóteles, su distinción entre el movimiento circular perfecto y la caída libre de los cuerpos, movimiento imperfecto, le inducía a rechazar la existencia de otros mundos. Sin embargo, otro argumento de carácter no racional debería dar luz, a su vez, a la idea de la pluralidad de mundos habitados.

La creencia en la omnipotencia divina llevó a imaginar la creación de otros mundos (8). En 1277, Étienne Tempier, obispo de París, condena doscientas diecinueve creencias, generalizadas en las universidades, que él consideraba heréticas porque limitaban el poder divino. Entre dichas creencias figuraba aquella que decía que «la causa primera no puede producir varios mundos». Basándose o no en esta condena, tomó cuerpo la crítica de Aristóteles. Occam (1280-1347) declaraba: «Afirmo que es probable que Dios pudiese

crear otro mundo, mejor que éste y de especie distinta al nuestro»; Oresme (hacia 1325-1382), al aseverar la existencia de una materia extraterrestre, abre la puerta a una concepción del mundo radicalmente nueva. De igual manera, Giordano Bruno (9), convencido de la validez del sistema de Copérnico, expresó su convicción de que tanto la grandeza del poder divino como la perfección de la naturaleza se manifestaban en la existencia de mundos innumerables (1591). Entregado a la Inquisición en 1592, quemado vivo en 1600, la principal acusación contra Bruno fue la de que negaba la divinidad de Cristo. Su convicción copernicana, su creencia en un número infinito de mundos no habían hecho más que agravar su situación.

La creencia en la pluralidad de mundos habitados se difundió por toda Europa. Ya desde 1593, Kepler (1571-1630) trabajaba en una obra (*El sueño de Kepler* o *Somnium*) (10), que apareció en 1434, después de su muerte, en la que describe a los habitantes de la Luna, su punto de vista sobre la Tierra, sus salidas, sus puestas y sus fases. Amplios préstamos de Kepler son evidentes en *Les États et Empires de la Lune* de Cyrano de Bergerac (1657) (11), pero la obra principal de divulgación científica en este terreno fue *Entretiens sur la pluralité des mondes habités* (1686), de Fontenelle (12). Hay que observar la habilidad de Fontenelle, quien describe a las criaturas inteligentes de otros mundos como si no perteneciesen a la humanidad: siendo así no había cuidados en cuanto al dogma cristiano, puesto que Cristo no tenía que ocuparse de su redención. Menos popular que los *Entretiens*, el *Cosmothéoros* de Huygens (1698) da prueba de más conocimientos astronómicos y concluye con la existencia de planetas habitados asociados a estrellas distintas del Sol.

La aparición en Europa de la idea de la pluralidad de los mundos habitados no se produjo sin dificultades. En cierta manera, su desarrollo ha sido el resultado de una nueva creencia, la creencia en el valor científico. Sin embargo, precisamente estos desarrollos científicos, al suscitar auténticas preguntas sobre el origen de la vida, son los que han terminado por hacer renacer las dudas. Hemos mencionado ya en la presentación el punto de vista de Jacques Monod, quien en *Le Hasard et la Nécessité*, no ve en la aparición de la vida, por complejo que sea el sistema reproductor, más que un efecto del azar.

Sin pretender cubrir una literatura inmensa, puede decirse que, si ciertos biólogos, hace 20 años, dudaban de la pluralidad de los

mundos habitados, los astrónomos, seguros de la universalidad de las leyes de la naturaleza, se preparaban para investigar sobre las inteligencias extraterrestres: el famoso proyecto Ozma de Drake data de 1960 (13). En la década de los años setenta se han llevado a cabo diversas series de experiencias de la misma naturaleza, pero con más poderosos medios de investigación de señales de radio coherentes, portadoras de información; ya veremos el significado de los resultados negativos obtenidos. En todo caso, parece que, hasta el momento presente, E.T. ha descuidado el acudir a la cita.

EL FIN DEL ANTROPOCENTRISMO

La especie humana, el *Homo sapiens* en el centro del Universo, he aquí el punto de vista aristotélico. Con la aparición, en el siglo XVI, de la ciencia moderna se libra la primera de las batallas para el abandono de nuestra provinciana visión del mundo. La Tierra deja de ser el centro del Universo, describe una enorme órbita alrededor del Sol, y no es más que un planeta entre los demás planetas. Giordano Bruno en *La Cena de le Ceneri* (1584) proclama que el mundo es infinito y en su diálogo en italiano *De l'infinito Universo mondo* hace, como nos dice Koyré (14), «la apología del nuevo Evangelio de la unidad y de la infinitud del Universo». Según Giordano Bruno (Koyré) (15) «... si en nuestra parte del espacio infinito existe un mundo, un astro-sol rodeado de planetas, lo mismo ocurrirá en todas las partes del Universo».

Con el empleo del telescopio, que permite que la Vía Láctea se descomponga en estrellas, Galileo rechaza la idea de un centro del Universo y afirma que las estrellas fijas son otros soles cuya distancia es tan grande que no podemos percibir el disco ni verlos más que como puntos luminosos.

¿Se debe hablar de la prudencia de Descartes tras la condenación de Galileo? Lo cierto es que, en los *Principia philosophiae* (1644), Descartes opone la *infinitud* de Dios al carácter *indefinido* del Universo. Era opinión corriente en la época que se trataba de una *pseudodistinción* destinada a congraciarse con los teólogos (Koyré) (16).

El lugar del Sol en la Galaxia y la naturaleza del Sol en relación con otras estrellas no se han conocido más que al comienzo de nuestro siglo. Shapley (1921) pudo demostrar, a través del estudio de ciertos sistemas de estrellas que gravitan en torno a nuestra Ga-

laxia, que el Sol está situado muy lejos del centro de la Vía Láctea. El descubrimiento de Hertzsprung y de Russell (1905-1915) de importantes propiedades de las estrellas puso inmediatamente de manifiesto que el Sol es una modesta estrella en medio de otras modestas estrellas (17). Lambert, en el siglo XVIII, y Charlier, en el XX, imaginan una jerarquía de sistemas y hacen desaparecer por completo cualquier idea de un centro que desempeñe un papel privilegiado. Esta desaparición se completa definitivamente con la teoría de la gravitación de Einstein (1915), que suscita la cuestión del punto de referencia absoluto en términos nuevos. El conjunto del Universo es la referencia absoluta, la referencia más evidente es la radiación del fondo del cielo descubierta por Penzias y Wilson en 1965. En esta referencia absoluta, nuestra Galaxia es una galaxia en medio de otras, sin posición ni características privilegiadas.

¿Se vacía, pues, el cielo de golpe? Así opina Koyré (1962) (18):

«Se ha destacado con frecuencia, de modo muy adecuado, que la destrucción del Cosmos y la pérdida por la Tierra de su situación central y, por consiguiente, única (si bien de ninguna manera privilegiada) llevaron inevitablemente al hombre a perder su posición única y privilegiada en el drama teo-cósmico de la creación en el que hasta entonces, y al mismo tiempo, había sido protagonista y escena. Al final de esta evolución nos encontramos con el mundo mudo y aterrador del "libertino" de Pascal, el mundo desprovisto de sentido de la filosofía científica moderna. Al final nos encontramos con el nihilismo y la desesperación.»

El «libertino» ateo de Pascal exclama: «El silencio eterno de estos espacios infinitos me espanta.» Ahora bien, tal espanto puede compensarse poblando el cielo con inteligencias extraterrestres. Como hemos visto, esto es lo que había hecho Epicuro: había llenado el Universo de mundos semejantes al nuestro y lo había poblado de manera similar.

Una reciente encuesta (1971) (19) de Littig entre los adeptos de los ovnis, o ufólogos, da testimonio de una actitud parecida. Quienes creen en los ovnis suelen ser personas que en la Tierra tienen necesidad de ser reconocidas y amadas. Los extraterrestres, potencias tutelares, les aportan, sin duda tan imaginaria como, para ellos, eficazmente, el apoyo moral y afectivo del que tienen falta. Lo mismo en la mitología del comienzo de los ovnis, en la que se explica que los marcianos vienen a advertirnos de los peligros cósmicos del

empleo del arma atómica (Gerald Heard, 1951), que en sus aspectos más recientes (Jean Miguères, 1979), en los que la llegada de los habitantes de Venus, anunciada para 1996, tiene por objeto salvar la Tierra de la destrucción, la necesidad afectiva de los extraterrestres se hace sentir con una fuerza asombrosa.

Incluso si la cuestión de los extraterrestres se aborda de manera científica, resulta difícil escaparse de la gran influencia de los más antiguos y profundos mitos de la humanidad.

DE LOS EXTRATERRESTRES A LA ASTROFÍSICA

Enunciemos un lugar común: los estudios de los científicos, los intentos de detectar una inteligencia extraterrestre parten del postulado de que hay, o de que puede haber, civilizaciones extraterrestres. Partiendo de este postulado, nos encontramos con una serie de interrogantes a los que no se puede contestar más que buscando la concatenación causal que, al tiempo que explica el surgimiento de nuestra civilización, permite establecer la verosimilitud de la existencia de civilizaciones extraterrestres o, por el contrario, su inverosimilitud.

La aparición de la ciencia y la utilización del saber científico para desarrollar los medios y métodos que no podían hacer del empirismo exigen una representación del mundo, la adquisición de la noción de realidad objetiva. Se suscita una cuestión importante, sobre la que volveremos después, pero cuyo planteamiento no podemos evitar: ¿Es una necesidad la transición de la técnica empírica a la ciencia? Y si tal transición se produce, ¿es posible establecer las causas de esta mutación?

Si nos remontamos unos dos o tres mil millones de años, la paleontología nos hace descubrir como bacteria fósil a la más antigua de las especies vivientes hoy día, *Eobacterium isolatum*. Henos aquí enfrentados con el problema del origen de la vida, que, a su vez, nos conduce al problema de las condiciones en las que pudo aparecer la vida: ¿dónde?, ¿en cuánto tiempo?, ¿con qué moléculas y con qué organización molecular?

Puesto que tenemos una idea de las condiciones de aparición de la vida sobre la Tierra, es posible hacernos preguntas sobre la formación de las estrellas con su cortejo de planetas, sobre la presencia de agua en su estado natural en uno de ellos, sobre el mantenimiento de condiciones favorables durante al menos cinco mil

millones de años. Para responder a estas cuestiones astrofísicas, hay que trazar un cuadro del mundo que nos rodea, no ya el cuadro completo de nuestros conocimientos sino el de aquellos que actualmente estén en relación con el problema de la existencia de la vida y de las civilizaciones extraterrestres.

Hablaremos, pues, de la universalidad de las leyes de la naturaleza, principio esencial de todo razonamiento astrofísico, de los constituyentes del Universo, de las galaxias, de la formación de las estrellas y de su evolución, de la composición química de los astros y de la formación de los elementos, de las hipótesis sobre los sistemas planetarios y de las teorías sobre la evolución de los planetas: tales son los principales elementos del orden astrofísico que nos permitirán, en la tercera parte, abordar el problema del origen de la vida y, una vez reunidos todos estos elementos, discutir las ideas actuales sobre las civilizaciones extraterrestres en la cuarta parte.

¿CUÁNTAS CIVILIZACIONES?

Drake (1960) (20) ha ofrecido una fórmula que facilita, al menos en principio, la estimación de la frecuencia de la Galaxia que alberga planetas donde se encuentra una sociedad tecnológica muy avanzada. La presentación de esta nueva fórmula hará que pongamos de manifiesto los datos fundamentales que deberán reunirse.

Aquí y ahora debemos hablar de frecuencias y probabilidades. Para poder comprender unos conceptos que no nos son familiares, tomaremos un simple ejemplo sacado de la vida diaria.

Consideremos el extremo siguiente: ¿cuántos profesores hay de ambos sexos, lectores de *Le Monde*, de menos de cuarenta años, que conduzcan un R5, un domingo por la mañana en la autopista A1, entre las 10 y las 11 horas, desde la entrada del túnel de Saint-Cloud hasta la primera salida «Versalles»?

Diremos que cada hora entran en el túnel un número M de R5 conducidos por un profesor de menos de 40 años, lector del periódico en cuestión. Es preciso un tiempo t_A (aproximadamente 3 minutos, es decir 1/20 de hora) para alcanzar la primera salida. El número de conductores que buscamos se obtiene realizando el producto del número M de vehículos (con el conductor que hemos definido) por el tiempo t_A pasado en este sector de la autopista para lograr el número L:

$$L = M \times t_A$$

¿Cómo obtenemos el número M? En el túnel entra un número de vehículos V igual a 6.000 a la hora. Aproximadamente existe un R5 por cada 6 vehículos, es decir una probabilidad $f_R = 1/6$ de encontrar un R5; la mitad de los conductores franceses tiene menos de 40 años, o sea una probabilidad $f_C = 1/2$; una cuarta parte de las ventas del periódico *Le Monde* se produce en París. Las ventas del periódico divididas por la mitad de la población adulta de París dan una probabilidad $f_M = 1/8$ aproximadamente de encontrar un lector de este periódico. Admitamos que 1/5 de los lectores del mismo sean profesores, esto nos da una probabilidad $f_E = 1/5$. El número M es el producto del número V por las probabilidades independientes (o supuestas como tales) de:

$$M = V \times f_R \times f_C \times f_M \times f_E$$
$$6.000 \times (1/6) \times (1/2) \times (1/8) \times (1/5)$$
$$M = 12{,}5$$

El número de profesores, lectores de *Le Monde*, de menos de 40 años, que conducen un R5 y que se encuentran un domingo por la mañana en la autopista A1, desde la entrada del túnel de Saint-Cloud hasta la primera salida «Versalles» es, por consiguiente:

$$L = 12{,}5 \times (1/20) = 0{,}625$$

Claro que se trata de un *número medio* (el número exacto es un número entero —evidentemente— afectado por las variaciones estadísticas) y sobre este sector de la autopista se pueden encontrar 1, 3,...10 ó incluso 0 conductores de las características que hemos definido; se trata de una *estimación*, puesto que tanto la frecuencia V como las probabilidades f_R, f_C, f_M, f_E no se han tomado de los datos estadísticos reales (lo cual sería posible) sino evaluadas sencillamente en *orden de magnitud*.

Para evaluar el número de civilizaciones extraterrestres seguiremos un procedimiento análogo. Trataremos de evaluar el *número medio* C de civilizaciones extraterrestres basándonos en datos más o menos seguros. Si cada año nacen P planetas susceptibles de acoger una civilización técnica avanzada y si estas civilizaciones tienen una duración media t_C, el número C es igual al número de planetas que han nacido en el intervalo t_C:

$$C = P \times t_c$$

Queda entonces por evaluar la frecuencia P. Nacen E estrellas por año en la Galaxia. No todas estas estrellas poseen sistemas planetarios y admitiremos una probabilidad f_p de cortejos de planetas. No todas estas estrellas satisfacen las condiciones de aparición de la vida y de su evolución, tal vez los planetas formados no posean la masa adecuada, ni estén situados a la adecuada distancia. Llamaremos f_B a la probabilidad de que una estrella sea una estrella «adecuada», f_M a la probabilidad de que un planeta tenga la masa «adecuada», f_d a la probabilidad de que el planeta se encuentre a la distancia «adecuada» de la estrella central. Vienen a continuación la probabilidad f_V de aparición de la vida, f_I la probabilidad de aparición de la inteligencia, f_C la probabilidad de aparición de una civilización tecnológicamente avanzada. Entonces se tiene:

$$C = E \times f_p \times f_B \times f_M \times f_d \times f_V \times f_I \times f_C \times t_C,$$

y habrá que discutir cada uno de estos términos: formación de las estrellas, formación de los planetas, exigencias de las estrellas, planetas, y sistemas planetarios, aparición de la vida, de la inteligencia y de las civilizaciones, duración de las civilizaciones. Como puede imaginarse, en torno a estas magnitudes hay un alto número de incertidumbres.

El tema es peligroso y es necesario distinguir bien entre aquello que se sabe y lo que es especulación, entre los modelos experimentados y los que todavía se encuentran en estado de hipótesis. No se puede limitar la discusión a una presentación de datos, de hecho lo que evidencia es una concepción del mundo, una teoría del conocimiento, una filosofía.

Pero quizá lo más importante y sugestivo sea que se lleguen a *plantear* los problemas, incluso si aún no se sabe cómo *resolverlos*.

I. SOBRE LA UNIVERSALIDAD DE LAS LEYES DE LA NATURALEZA

SOBRE LO UNIVERSAL

¿Cómo mostrar de dónde extrae hoy día el sabio el principio de la universalidad de las leyes de la naturaleza? Es necesario que nuestra demostración se desarrolle lentamente, ya que cada uno de los pasos es el producto de una evidencia, de una reflexión elemental. Para comenzar, es preciso explicar qué se entiende por «leyes de la naturaleza». El contenido de esta expresión no es el mismo hoy que en tiempos de Lucrecio, cuando ya se hablaba de leyes *(logos)* inspiradas por el movimiento regular de los astros, pero sí que hay algo de común en el proceso mental.

Desde el momento en que una teoría explica los fenómenos de manera racional, parece natural, en igualdad de condiciones, atribuirle validez universal. Insistamos, de paso, en la expresión *en igualdad de condiciones*. La historia de las ciencias, y en particular de la física, nos enseña que no existe modelo ni teoría válidos en todas las condiciones. Según Lucrecio los átomos pueden asociarse de una infinidad de maneras para configurar los objetos y seres que nos rodean (1), lo mismo que las letras del alfabeto permiten formar una infinidad de palabras de significados diversos. Esta afirmación no parece contradictoria y su validez universal parece conseguida desde entonces. En la actualidad no nos podemos contentar solamente con la lógica para enunciar una afirmación semejante, pero el modo de ampliar la validez de una ley no es diferente en definitiva.

Nuestra aproximación se efectuará en varias etapas. En primer lugar se enunciará la más antigua de las leyes universales, la ley de

la gravitación. Inmediatamente se observará, al estudiar los objetos (estrellas, galaxias) que llenan el cielo, que esta universalidad de las leyes de la naturaleza física se nos impone. Es imposible la comprensión de las estrellas y de las galaxias, en sus semejanzas y desemejanzas, sin admitir la universalidad de las leyes físicas.

No parece posible transmitir al lector la emoción del físico delante de la naturaleza sin abordar una propiedad profunda de la naturaleza, todavía no comprendida por completo. Las interacciones entre los elementos constitutivos de la materia hacen intervenir cuatro fuerzas fundamentales. Estas cuatro fuerzas parecen depender de un principio único, que los físicos se esfuerzan por encontrar, principio que podría estar en la base de la unidad del Universo.

Dos de estas fuerzas pertenecen a nuestra experiencia cotidiana: las fuerzas eléctricas y las fuerzas gravitatorias. Las otras dos, que intervienen en lo profundo del núcleo del átomo, se denominan interacciones «fuertes» e interacciones «débiles». Ya ha sido posible hallar el principio común a las fuerzas electromagnéticas y débiles, comprobado experimentalmente por el descubrimiento en el CERN (1983) de nuevas partículas (los bosones $W^{\pm}$ y Z^{o}) cuya existencia había sido ya prevista por Weinberg y Salam (2).

Dedicar algunas páginas a explicar el funcionamiento del núcleo del átomo ayuda a comprender la evolución de la composición química de las galaxias y la duración de la vida de las estrellas. Ambos datos desempeñan su papel en nuestro problema. La aparición de la vida está ciertamente ligada a los elementos disponibles, aunque sea difícil decir con exactitud de qué manera interviene la abundancia de elementos químicos; asimismo depende del régimen térmico que una estrella hace reinar sobre los planetas que la rodean.

LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

El descubrimiento de una ley universal es, en primer lugar, un dato de la experiencia.

En este sentido el descubrimiento de Galileo de los satélites de Júpiter tiene una capital importancia: significa que los planetas pueden perfectamente girar en torno al Sol, como Io, Ganimedes y Calisto lo hacen alrededor de Júpiter; el descubrimiento de Kepler muestra que los planetas describen elipses alrededor del Sol, en las que éste ocupa uno de los focos. Toda vez que los mismos efectos se deben a las mismas causas, existe una razón primera que explica

el movimiento de los planetas. Esta razón primera ha sido enunciada por Newton y se denomina ley de la gravitación universal. Por vez primera llegamos aquí a una ley demostrada cuya validez se extiende más allá de la experiencia humana sobre la Tierra. Gobierna tanto el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra, como el movimiento de los planetas en torno al Sol. La observación no debería tardar en revelar que el cielo estrellado contiene un gran número de sistemas binarios, las *estrellas dobles*. En estos sistemas, cada estrella describe un elipse cuyo centro de gravedad común ocupa uno de los focos.

El movimiento de Urano presentaba anomalías no explicables por la influencia de los planetas conocidos a comienzos del siglo XIX. En el momento de la conjunción de Urano con un cuerpo desconocido del sistema solar, las perturbaciones alcanzaban su punto máximo. Independientemente, Adams y Le Verrier investigaron cuáles eran las propiedades de ese cuerpo desconocido en la propia época de la supuesta conjunción.

Por medio de algunas hipótesis en relación con los elementos de la órbita, en especial suponiendo que el semieje mayor de la órbita de Neptuno venía dado por la ley empírica de Bode-Titius (ver págs. 54-56), Le Verrier pudo calcular un excelente arco de trayectoria celeste de Neptuno, a partir de lo cual se produce el inmediato descubrimiento a cargo de Galle.

El descubrimiento de Neptuno provocó el entusiasmo. De pronto, la ley de la gravitación universal se cargaba de un nuevo significado. Ya no sólo explicaba el movimiento de los planetas conocidos, sino que además el descubrimiento de un nuevo planeta le otorgaba categoría de representación de la realidad.

Se trató de poner en duda el valor de los resultados de Le Verrier. De hecho, un amplio grupo de órbitas habría llevado a calcular aproximadamente el mismo arco celeste y, por tanto, también habría llevado al descubrimiento por medio de la observación, ya que lo esencial del resultado se refiere al estudio del movimiento de Urano en el momento de la conjunción*.

Estas discusiones *a posteriori* parecen ociosas y en nada disminuyen la gloria de Le Verrier. La ley de la gravitación universal gobierna el movimiento de los planetas, el movimiento de las estrellas

* En astronomía se dice que hay conjunción de dos planetas cuando éstos se encuentran alineados en relación con el Sol y próximos entre sí.

en la Galaxia e incluso el movimiento de las galaxias en los sistemas de las galaxias. Esta jerarquía de los sistemas gravitatorios ya había sido concebida por Lambert (1761) y vuelta a estudiar por Charlier (1921) (3).

La historia de la gravitación no se termina con el descubrimiento de Neptuno. El movimiento de Mercurio, conocido con exactitud extremada, causó muchas preocupaciones a Le Verrier. El eje mayor de la órbita de Mercurio gira alrededor del Sol con una diferencia de 43 segundos de arco por siglo, lo que era inexplicable para la época. Fue preciso esperar a la nueva teoría de la gravitación de Einstein (1916) para explicar tal movimiento. Con escasas diferencias con la gravitación newtoniana en cuanto a la escala del sistema solar, la gravitación einsteiniana adquiere trascendental importancia en los casos extremos de los cuerpos muy densos, de los cuerpos en rápido movimiento o de los fenómenos a escala del Universo.

LA NATURALEZA DE LAS ESTRELLAS

Al colocar al Sol en el centro, Copérnico había comprendido a la perfección que el movimiento de la Tierra sobre su órbita debía remedar el movimiento aparente de las estrellas sobre la bóveda celeste en relación con los puntos de referencia atribuidos a la Tierra. La ausencia de todo movimiento aparente observable llevaba a alejar las estrellas a una distancia inmensa. La discusión sobre la naturaleza finita o infinita del mundo salía del razonamiento lógico o de la metafísica para entrar en el dominio de la ciencia. Sin duda, para Epicuro o para Lucrecio el mundo es infinito, pero sólo en razón de un principio explicativo según el cual lo lleno, lo vacío, lo lleno, etcétera, se repiten constantemente hasta el infinito.

Alejar las estrellas en su ubicación no hacía más que plantear

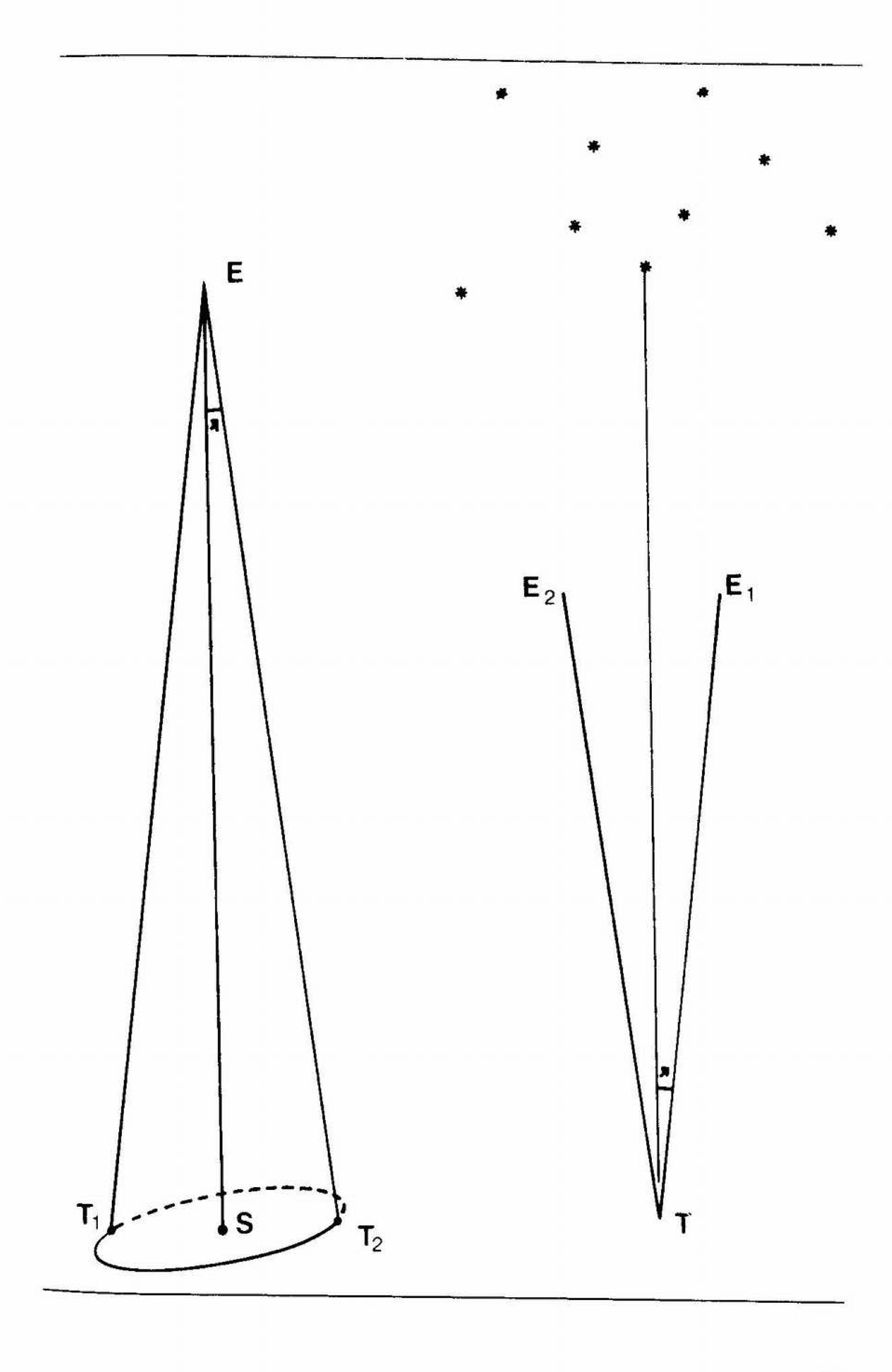


Fig. 1. *La distancia de las estrellas.* Desde una estrella E, un observador ▶ vería cómo la Tierra gira alrededor del Sol y recorre en 6 meses, de T_1 a T_2, la mitad de su órbita. Desde la Tierra, la dirección de observación de la estrella E cambia, de TE_1, paralela a T_1E a TE_2, paralela a T_2E: es el efecto de la paralaje. El ángulo E_2TE_1 se mide en segundos de arco. Es igual a dos veces la paralaje π.

Para un ángulo π de un segundo de arco la distancia TE es igual a 3,26 años-luz, o sea 30.870.000 kilómetros. La relación entre la distancia y la paralaje es d (a.l) = (3, + (/π).

en términos cuantitativamente diferentes el problema de lo finito o de lo infinito, pero sin alterar su naturaleza. Lo infinito asusta y Descartes, por ejemplo, habla de mundo indefinido (¿sería un prurito estilístico?).

Pero este alejamiento de las estrellas sí cambiaba su naturaleza. De lucecitas pegadas a la bóveda celeste pasaban a ser astros resplandecientes y ardientes que sólo la lejanía hacía aparecer como puntos brillantes. «No hay nada que se oponga (...) a la existencia de una infinitud de mundos», afirmaba Epicuro (4): desde el momento en que las estrellas son alejadas en su ubicación, este principio queda realizado.

Sentados en el tren que corre por la vía, vemos desfilar rápidamente los árboles que bordean el talud, mientras las colinas lejanas permanecen casi inmóviles. De la misma manera, el majestuoso movimiento de la Tierra sobre su órbita cambia la perspectiva del cielo: las estrellas próximas se mueven en relación con las estrellas lejanas.

Han sido necesarios muchos años para llegar a determinar la distancia de las estrellas, incluso de las más próximas, puesto que los movimientos aparentes de las estrellas sobre la esfera celeste tienen una amplitud muy pequeña. No fue hasta el siglo XIX con Bessel (1838) cuando se midió la primera *paralaje**, la de la estrella 61 Cygni, algo inferior a 1 segundo de arco (0,29", lo que corresponde a una distancia de 10,6 años-luz; la estrella más cercana, *Próxima del Centauro*, se encuentra a 4 años-luz).

Consideremos una fuente luminosa que emita uniformemente en todas direcciones. La cantidad de energía luminosa que cada segundo atraviesa una esfera centrada sobre la misma fuente de luz es evidentemente la misma, sea cual sea el radio de la esfera, si no hay ninguna materia absorbente en el trayecto de la luz. Pero la superficie de la esfera es proporcional al cuadrado de su radio. La cantidad de energía luminosa, o flujo luminoso, que atraviesa una unidad de superficie es consecuentemente proporcional en razón inversa al cuadrado de la distancia. Esta ley ha sido verificada en el laboratorio. Es verdadera para la geometría euclidiana, que es la geometría de la que aquí tenemos necesidad para nuestros propósitos. Próxima del Centauro está situada a una distancia igual a 250.000 veces la distancia de la Tierra al Sol. Otro sol, colocado

* Se denomina paralaje de una estrella al ángulo bajo el cual un observador, colocado sobre esta estrella, vería el radio de la órbita terrestre (ver fig. 1).

a esta distancia, nos enviaría a la pupila del ojo un flujo 62.000 millones de veces más débil que el que recibimos de nuestro Sol. Así se comprende la aparente debilidad luminosa de las estrellas.

La existencia de una multitud de estrellas, astros semejantes al Sol, cumple el principio de universalidad de Lucrecio, pero es preciso dar un paso más en nuestros conocimientos para ver funcionar las leyes físicas universales.

LA LUZ DE LAS ESTRELLAS

Todo el mundo conoce los colores del arco iris, los reflejos irisados de las manchas de aceite en la carretera mojada. La luz blanca es la sensación que produce en el ojo una concreta superposición de colores. Hay diversas formas de separar los distintos componentes cromáticos de la luz que provenga de una fuente cualquiera; la utilización de un prisma es la más sencilla.

Si a través de un prisma se contempla la luz roja del tubo de neón de un anuncio, o la luz amarilla de una lámpara de vapor de sodio, como las que iluminan las autopistas, en cada caso se observa que sólo son brillantes algunas estrechas bandas de color: se denominan rayas espectrales. En 1859 descubre Kirchhoff no sólo que cada elemento químico se caracteriza por las rayas que emite (cada raya se puede describir como una emisión de un color muy puro, casi monocromático), sino que todo elemento puede absorber las rayas que puede emitir. Se denomina *espectro* a la figura obtenida al disponer los diferentes componentes coloreados de la luz. Las rayas toman el nombre de *rayas espectrales*. El estudio de las rayas espectrales ha desarrollado una disciplina: la *espectroscopia*. La clasificación de las rayas espectrales está en la base de toda nuestra comprensión de los átomos y de las moléculas.

El descubrimiento de Kirchhoff tuvo de inmediato importantes consecuencias astronómicas. Secchi, al observar con un espectroscopio algunas estrellas brillantes, no tardó en identificar algunos elementos químicos.

Este descubrimiento puso de manifiesto la unidad de composición química del Cosmos. Los mismos procesos microscópicos responsables sobre la Tierra de la formación de la radiación se encontraban funcionando en el Sol y las estrellas. Todavía fueron necesarios muchos años antes de descifrar el mensaje de las estrellas y de comprobar que los mismos elementos químicos y las mis-

mas moléculas tienen una presencia universal. La ciencia-ficción ha supuesto con frecuencia el dominio de elementos desconocidos en la Tierra y reconocibles en el espectro por rayas no identificadas (así ocurre ya en *La guerra de los mundos*, de H.G. Wells, y en *Last and first Man*, de Olaf Stapledon). Esta idea es incompatible con los datos de la experiencia. Todos los elementos identificados en la luz de las estrellas son conocidos en la Tierra (pero, a la inversa, no se han encontrado en las estrellas todos los elementos de la clasificación periódica de elementos de Mendeleev).

La presencia por doquier en el Universo de los mismos elementos también es la afirmación del principio de universalidad de Lucrecio. Pero, además, esta presencia tiene otra significación. La producción de las rayas espectrales está regida por leyes que ponen en juego constantes físicas microscópicas: la carga y la masa del electrón y del protón y la magnitud esencial de la física microscópica, la constante de Planck.

La presencia de las mismas rayas hasta en los astros más alejados que podamos conocer nos muestra que estas constantes físicas poseen el mismo valor en todo el Universo. Los mismos mecanismos físicos son los que en todas partes engendran los mismos espectros.

La prueba cuantitativa de la universalidad de las leyes de la física atómica se extiende ahora hasta los confines del Universo observable.

¡Qué profunda impresión produce el comprobar que las mismas leyes de la física atómica están funcionando en las galaxias más distantes, a miles de millones de años-luz! El pensamiento moderno enlaza, pues, de nuevo y de forma concreta, con el pensamiento de los atomistas y en particular con el de Lucrecio.

DE LAS ESTRELLAS A LAS GALAXIAS

Inicialmente denominadas *nebulosas* a causa de su aspecto «nuboso» al telescopio, las galaxias fueron descubiertas por Herschel en el siglo XVIII, pero ha habido que esperar hasta el comienzo del siglo XX para que los *Universos-islas* de Herschel sean situados correctamente en el espacio. No resueltas o imperfectamente resueltas en estrellas, de las observaciones anteriores no había surgido ninguna indicación clara en cuanto a la distancia a la que se encontraban estas nebulosas.

No es éste el lugar de explicar técnicamente de qué forma la distancia de estas galaxias ha sido establecida por la astrofísica. Es más importante, sin duda, la presentación de algunos principios metodológicos.

Todos los métodos puestos en funcionamiento tienen un punto en común: utilizan la idea de ley universal y, por un efecto de retroacción, prueban su validez.

Cada uno de estos métodos es independiente de los demás, si bien todos se completan y justifican recíprocamente. Su contenido físico común es la ley de la razón inversa del cuadrado de la distancia, de la que ya hemos hablado en la página 18: de dos fuentes de igual potencia, si una está situada a una distancia diez veces mayor que la otra, parece cien veces más débil.

El descubrimiento por medio de la observación de familias de estrellas que presentan características comunes (Hertzsprung, 1905; Russell, 1914; Miss Leavitt, 1915) hace que aparezca una ley empírica universal: dos estrellas que presentan las mismas características son fuentes luminosas de la misma potencia.

La distancia de las estrellas tipo, miembros de estas diversas familias y pertenecientes al entorno solar, ha sido medida por los astrónomos. La comparación con estrellas de las mismas familias, ubicadas en las galaxias «próximas», posibilita establecer su distancia. Una estrella de la familia I, observada en una galaxia G, permite fijar la distancia *d* de dicha galaxia. Se controla este resultado utilizando una estrella de esa galaxia, perteneciente a la familia II. Se verifica entonces que aquélla permite atribuir a la galaxia G la misma distancia *d*. Así se determina la distancia de la galaxia G, pero al mismo tiempo, por el control efectuado al utilizar las estrellas de las familias I, II,... se prueba la validez de la ley universal de la que se ha partido.

Mencionemos, para concretar, algunas galaxias próximas: las nubes de Magallanes, las dos situadas a unos 300.000 años-luz, y la «nebulosa» de Andrómeda (debería decirse la galaxia de Andrómeda) situada a unos 2 millones de años-luz, en ambos casos perceptibles a simple vista.

Las galaxias, ubicadas así a cientos de miles, a millones de años-luz, se aparecen entonces como vastos sistemas que abarcan miles, incluso centenares de miles de millones de estrellas. Una galaxia típica, como Andrómeda, posee un diámetro de 60.000 años-luz.

La observación del cielo revela la presencia de innumerables galaxias. Son accesibles a la observación aproximadamente unos

2.000 millones de galaxias; con un número tan desmesurado no puede concebirse estudio exhaustivo alguno. El telescopio espacial hará, sin duda, el número de galaxias observables quinientas veces mayor. Es evidente que las observaciones completas en profundidad no son posibles más que en limitadas regiones del cielo.

SIMILITUD DE LAS FORMAS

Los detalles de estructura son accesibles en las galaxias más brillantes. La observación demuestra que no existen dos galaxias idénticas; pero también muestra que hay formas semejantes, la más conocida de las cuales se caracteriza por presentar brazos espiroideos. La presencia en el Universo de unos mismos aspectos morfológicos obliga a pensar que la misma física gobierna la aparición de estas formas; en la actualidad se piensa que la gravitación define las formas de estos grandes sistemas en rotación. Los efectos de marea cuando una galaxia pasa por las proximidades de otra se encuentran en la base de las formas más características.

De modo más evidente todavía que la formación de las rayas espectrales, la morfología de las galaxias pone en primer plano la unidad del Universo y la universalidad de los mecanismos físicos en acción, ya que las formas son visibles e identificables inmediatamente en las fotografías, sin ayuda de instrumentos de medida suplementarios que vengan a completar o ampliar el poder de la vista desnuda.

Se supone que no hay nada que se parezca más a una margarita que otra margarita. No obstante, desde la óptica del naturalista, y tras un examen minucioso, no existen dos margaritas idénticas en un prado.

En el Universo no existen dos galaxias idénticas (5).

Tanto en un caso como en el otro, desempeña su papel un determinismo que, con variantes secundarias, define el objeto final: la unidad del Universo se prueba tanto en el prado vecino como a millares de millones de años-luz.

LA CONSTITUCIÓN DE LAS ESTRELLAS

A comienzos del siglo XIX, la medida de la cantidad de calor que provenía del Sol y que llegaba cada segundo a la Tierra planteó, por vez primera, de forma rigurosa, la cuestión de las fuentes de la energía solar.

La cantidad total de energía producida cada segundo por el Sol es enorme. En cuanto se trata del Sol y de las estrellas, todo se desarrolla a una escala no comparable con la de los fenómenos terrestres. Si, por ejemplo, toda la potencia del Sol se aplicase sobre la superficie de la Tierra, por cada segundo transcurrido se volatilizaría una capa de un kilómetro de espesor.

El estudio de la constitución de las estrellas no aporta más que pruebas indirectas de la universalidad de las leyes de la física microscópica: carecemos de observación directa sobre los procesos que tienen lugar en el interior de las estrellas y que rigen su evolución. Pero la lógica del razonamiento, su rigor, su coherencia, su concordancia con la experiencia terrestre, las exigencias causales, obligan a admitir que, en esencia, estas teorías son ciertas.

Desde los procesos microscópicos que actúan en el corazón de las estrellas hasta las propiedades globales de las mismas, tal como pueden observarse y medirse, hay una larga cadena de teorías que encajan entre sí, aunque el hilo conductor de sus exigencias causales pudiera parecer muy frágil a quien no esté al corriente. La teoría del interior de las estrellas que, año tras año, requiere teorías físicas más precisas, cada vez más elaboradas, progresa con regularidad y permite esperar un acuerdo todavía mejor entre los resultados de los cálculos y los de la observación.

Si la energía solar proviniese de una combustión en el sentido ordinario del término, un sol de carbono y oxígeno quemaría a este ritmo todas sus reservas en 2.000 años. Pero los geólogos, al medir la edad de la Tierra por el tiempo de formación de sus sedimentos, descubren que data de varios miles de millones de años. Para conciliar estos datos con los de la física, sería preciso servirse de las leyes convenientes de la física microscópica, lo que no puede hacerse ciertamente de buenas a primeras.

A mediados del siglo XIX los físicos abordaron por vez primera la cuestión de la fuente de energía de las estrellas. Kelvin y Helmholtz propusieron como fuente la energía gravitatoria, pero tal reserva de energía se agotaría con demasiada rapidez: sólo duraría 30 millones de años. Sólo 70 años más tarde se descubrió el verdadero origen del caudal de energía de las estrellas.

Con la revelación de Einstein (1905) de la famosa relación $E = mc^2$ entre la masa y la energía (*c* es la velocidad de la luz), resultaba posible concebir que la transmutación de una especie quí-

mica en otra distinta liberara la enorme energía en reserva en los núcleos de los átomos.

Así fue como Harkins y Wilson (1915), Eddington (1920), Jean Perrin (1920) (6) pudieron sugerir que el Sol extrae su energía de la conversión del hidrógeno en helio.

De todas formas, todavía hubieron de pasar algunos años hasta que, en 1938, Weizäcker y Bethe, de manera simultánea, demostraron mediante qué proceso realizado en el interior de las estrellas se lograba esta transformación de hidrógeno en helio: cada segundo, en el interior del Sol, se transforman en helio 560 millones de toneladas de hidrógeno, pero la masa del Sol es tan grande que se precisan miles de millones de años para que consuma sus reservas. La explicación de la fuente de energía del Sol a partir del núcleo del átomo por fin permitía poner de acuerdo a geólogos y astrónomos sobre las edades de la Tierra y del sistema solar y, obviamente, fijar que el Sol era al menos tan viejo como la Tierra.

Destaquemos sumariamente la concatenación causal que permite explicar la producción de energía de las estrellas, indicando los diversos procesos físicos que intervienen. La estrella tipo sigue siendo para nosotros el Sol.

— La *ley* de Torricelli (equilibrio de fluidos en un campo gravitatorio) y la *ley* de la gravitación de Newton tuvieron como consecuencia la demostración de la existencia de presiones muy elevadas en el centro del Sol.

— La *ley* de Mariotte y Gay-Lussac (ley de los gases perfectos) por sí sola sugiere ya que estas altas presiones van asociadas a temperaturas muy elevadas.

— Al utilizar la *ley* de Fourier, del transporte del calor, se puede llegar a una especificación razonable de esta temperatura central (aproximadamente 15 millones de grados).

— Bajo el efecto de esta temperatura muy elevada, los núcleos de los átomos se agitan en todos los sentidos como lo describe la *ley* de Maxwell, con velocidades suficientes para poderse penetrar siguiendo la *ley* de Gamow. Se producen entonces reacciones nucleares cuyo resultado lo registra la *ley* de Einstein sobre la equivalencia entre materia y energía, liberando así la enorme cantidad de calor que es necesaria para que el Sol brille.

En la descripción que esta concatenación causal hemos marginado cierto número de detalles que, particularmente en el nivel microscópico, hacen intervenir otras concatenaciones causales a lo largo de cuyo desarrollo se dan todavía otras leyes que intervienen. Pero, en algún sentido, estas otras leyes son auxiliares de las siete que acabamos de mencionar para explicar la razón del brillo solar.

La explicación coherente de la radiación del Sol y de las estrellas, que satisface las exigencias causales más rigurosas, demuestra que estas siete leyes, establecidas en la Tierra, mantienen su validez en el Universo entero.

¿Y NUESTRO TEMA?

Hagamos aquí una pausa.

Las leyes que acabamos de citar corresponden a *etapas* distintas de la constitución de la materia. Tenemos una serie de leyes que hacen intervenir un gran número de átomos a la vez (ley de la gravitación universal, ley del equilibrio hidrostático, ley de los gases), leyes que hacen intervenir la estructura particular de los gases (las velocidades de los núcleos de los átomos), leyes que hacen intervenir las propiedades microscópicas de los átomos (interacción materia-radiación), o propiedades microscópicas de los núcleos (sus interacciones).

Podemos afirmar que cada uno de los aspectos del movimiento de la materia que hemos separado es una *etapa* de la constitución de la materia. El paso de una etapa a otra es necesario si quiere comprenderse el Universo; pero el paso de una etapa a otra también es una reflexión sobre la representación del mundo, una prueba intelectual.

En estas distintas etapas, ¿qué es lo que pertenece a un planteamiento descriptivo y qué es lo que se corresponde con la realidad? Dos átomos juntos requieren el microscopio pero, por ejemplo, un gran número de átomos juntos constituyen un gas de cuya constitución particular puede hacerse abstracción. ¿En qué momento se pasa de lo microscópico a lo macroscópico? Volveremos más adelante sobre los planteamientos indicados.

¿Qué relación, pues, tiene todo lo anterior con las civilizaciones extraterrestres? Esta relación se funda en una idea, idea que es preciso explicitar cuidadosamente y según la cual, de etapa en etapa, se crece del núcleo al átomo, del átomo a la molécula (y, de ahí, a los gases, a los fluidos, a los sólidos, a los planetas y a las estrellas), de la molécula a la célula, de la célula al organismo, del orga-

nismo a la sociedad, de la sociedad a la civilización; y tal encadenamiento es universal.

¿De dónde ha nacido esta idea? ¿De dónde procede la convicción de que este encadenamiento es universal? Sin ninguna duda del hecho de que sabemos ascender por los escalones que conducen a las primeras etapas de esta construcción. De ahí el interés, desde el punto de vista del desarrollo de este concepto, de seguir con precisión y detalle estas primeras etapas.

Esto es lo que vamos a hacer en las páginas siguientes.

Subrayemos, sin embargo, que la idea de un encadenamiento universal, del átomo a la civilización, descansa sobre una generalización, una ampliación a todo el Universo de lo que observamos sobre la Tierra, que a la vez es un rechazo del antropocentrismo y un rechazo a la creencia de que lo que aquí existe no pueda existir también en otro lugar. A estas razones (¿de orden racional?), que ya se encuentran en Epicuro y en Lucrecio, se añaden otras, sobre las que volveremos cuando hagamos el balance y que son de orden no racional sino, hablando con propiedad, de orden irracional.

Vamos, pues, a resumir, la profunda unidad del mundo físico, de la Tierra a las galaxias más alejadas, unidad cuya potencia evocadora no nos puede dejar indiferentes.

LAS CUATRO FUERZAS DE LA NATURALEZA

Ya hemos visto las fuerzas de la gravitación que regulan los majestuosos movimientos de los planetas, de las estrellas y de las galaxias, y las fuerzas electromagnéticas que fijan la estructura de los átomos y la producción de la luz.

Hay otras dos fuerzas que gobiernan la estructura de la materia. Una de ellas es, en cierto modo, el cemento que liga entre sí a protones y a neutrones, a los constituyentes del núcleo del átomo. Capaz de superar la repulsión mutua de los protones, cargados de electricidad positiva, recibe la denominación de *interacción fuerte*. La otra interviene en el proceso radiactivo. La desintegración con emisión de electrones positivos o negativos se acompaña de la producción de partículas sin masa (o casi sin masa), los neutrinos y los antineutrinos. La unión de los neutrinos o de los antineutrinos es sumamente débil y se ejerce a través de una fuerza denominada *interacción débil*.

El papel de tales interacciones —experimentales en el laboratorio— en el interior de las estrellas y hasta los confines del Universo ha podido ser reconocido. Las interacciones fuertes permiten ofrecer la razón profunda del caudal de energía de las estrellas. Las interacciones débiles se operan en el centro del Sol, donde son responsables de la producción de los neutrinos solares cuya detección, difícil, es, sin embargo, un hecho incontestable. Finalmente, el efecto conjunto de las interacciones fuertes y de las interacciones débiles se halla en la base de la producción primordial de los elementos ligeros (hidrógeno, helio) tal como se les encuentra por doquier en el Universo*.

Esta unidad del mundo físico, impresionante aun a los ojos del especialista, ha movido a los físicos a una grandiosa empresa denominada *gran unificación* (7) y que se propone reducir las cuatro fuerzas de la naturaleza a un principio único. El éxito de esta tentativa en cuanto a las fuerzas electromagnéticas y las fuerzas débiles, coronado por el descubrimiento en el CERN de las partículas $W^{\pm}$ y Z^{0}, con la masa predicha por la teoría, inicia en la práctica la realización de una de las principales ideas expuestas por Lucrecio en *De rerum natura*.

LA UNIDAD DEL MUNDO FÍSICO Y LA ORGANIZACIÓN DE LA MATERIA

La unidad del mundo físico en toda su extensión observable es algo impresionante: en todo el Universo observado no hay partícula, ni fuerza, ni átomo distintos de los que observamos y medimos sobre la Tierra. Vamos a ver cómo se confirma esta unidad a escala estelar y galáctica.

A gran escala, la fuerza organizadora es la gravitación. Ésta es una fuerza de amplio radio de acción (decrece en razón inversa al cuadrado de la distancia) que no conoce pantalla, a diferencia de la fuerza entre partículas cargadas de electricidad. No existe fuerza gravitatoria que rechace, la materia atrae a la antimateria como la materia obedece la ley de la gravitación.

Si, por un instante, imaginamos que en el espacio hay dos obje-

* El lector exigente encontrará en un anexo una presentación más pormenorizada de las nociones fundamentales de la física de las interacciones fuertes y de la física de las interacciones débiles, así como de su universalidad.

tos, dos guijarros o dos astros, *en reposo* en cuanto a su relación recíproca, no hay nada que se oponga a que se precipiten uno contra el otro. Sin embargo, la hipótesis del reposo relativo es puramente especulativa. Se corresponde a lo que se denomina *experiencia mental*. En la realidad, por lo general, están dotados de un movimiento relativo. Si giran uno alrededor del otro, la fuerza centrífuga se opone a la atracción gravitatoria. Puede decirse que *el movimiento puede oponerse a la gravitación*. Esto es lo que testimonian todos los objetos presentes en el cielo: todas las grandes estructuras observables son, en definitiva, una especie de compromiso entre la atracción gravitatoria y el movimiento.

Meteoritos y asteroides

En las pequeñas estructuras, tales como los meteoritos, o bien sobre la Tierra las de los pequeños objetos sólidos, los guijarros o los peñascos, la gravitación sólo desempeña un papel secundario. Puede uno preguntarse, pues, a partir de qué momento la gravitación logra y desempeña este papel organizador importante. En relación con los sólidos, la gravitación modela su forma y les aproxima tanto más a la forma esférica cuanto mayor sea su masa. Para esto basta con que la fuerza de cohesión debida a la gravitación supere a las uniones entre los átomos. Cualitativamente, esta condición está realizada por los valores de la masa o del radio que dependen de la naturaleza del sólido. Los asteroides, pequeños astros que circulan en el sistema solar entre la órbita de Marte y la órbita de Júpiter, son casi todos demasiado pequeños para tener forma esférica. Se trata de grandes piedras de forma irregular. La Luna (3.476 km de diámetro), los satélites galileos de Júpiter, Io (3.740 kilómetros), Europa (3.150 km), Ganimedes (5.150 km), Calisto (5.180 km), el mayor satélite de Saturno, Titán (4.200 km), Mercurio (5.000 km), Marte (6.780 km) poseen formas esféricas o casi esféricas. La transición entre la forma esférica y la forma irregular debe producirse para un diámetro del orden de 2.000 km.

Estrellas

Cuando se trata de masas gaseosas, la agitación microscópica de los átomos o de las moléculas impide que se produzca el desmoronamiento, al crear una resistencia a la destrucción y, al mismo tiempo, la gravitación retiene los átomos o las moléculas y les impide que se dispersen en el espacio. Evidentemente éste es el caso de una estrella como el Sol, en la que la agitación térmica de los átomos, del centro a la superficie, se opone a la fuerza gravitatoria. Por supuesto que la dificultad es el hallar la solución a cómo se reunió una masa semejante de gas. Éste es el problema de la formación de las estrellas y constituye un elemento clave de nuestro estudio, que de inmediato examinaremos.

Galaxias

A otra escala diferente, consideramos el movimiento de las estrellas. En un sistema doble, dos estrellas giran en torno a un centro de gravedad común y existe una relación directa entre su masa, su distancia mutua (en astronomía se denomina su separación) y la rapidez de su movimiento orbital. Pero esta sencilla relación se desvanece en cuanto hay más de dos estrellas. Los movimientos de varias estrellas, aunque cada uno obedezca a una ley elemental, son muy complicados, ya que cada estrella está sometida a la influencia de todas las demás. El cálculo de los movimientos de las estrellas en un sistema semejante se ha hecho posible gracias a los grandes ordenadores. *Se sigue* el movimiento de cada estrella y, gracias a una representación gráfica, *se ve* cómo se estructura el sistema. En el momento actual puede realizarse lo que se denomina *simulación numérica* de un sistema de varios millones de estrellas.

Las galaxias presentan una estructura; la clasificación de las diversas estructuras fue realizada por vez primera por Hubble (1936) (8), quien las dividió en elípticas, espirales e irregulares. La multiplicación de las observaciones ha evidenciado que las estructuras eran mucho más complejas y, sobre todo, que la interacción entre las galaxias era un fenómeno ordinario de forma tal que no puede estudiarse una galaxia sin interrogarse sobre su entorno.

Diversidad

La unidad física del Universo no está en oposición a la extraordinaria diversidad de formas y propiedades que exhiben los objetos que lo integran. Esta diversidad es conocida para los astrónomos

puesto que éstos comparan entre sí objetos astronómicos relativamente poco numerosos.

Expliquemos esta expresión: «relativamente poco numerosos». En un metro cúbico de aire se encuentran 30 millones de miles de millones de miles de millones de moléculas. En nuestra Galaxia no existen más que 100.000 millones de estrellas y, con los medios actuales (a la espera del telescopio espacial), podríamos contar en el cielo más o menos el mismo número de galaxias.

No consideramos individualmente las moléculas de nitrógeno y de oxígeno del aire porque son idénticas, y su número inmenso permite tratar la atmósfera terrestre como si fuese un medio continuo. En comparación con el número de moléculas de un metro cúbico, hay pocas estrellas en una galaxia. Apenas existen dos estrellas idénticas. El sistema menor, incluso si se trata de estrellas dobles, es casi único en su género, y dos galaxias, por semejantes que sean, son, no obstante, reconocibles por poco que se distingan sus peculiaridades.

Las estadísticas sobre los objetos astronómicos, a fuerza de observar en su clasificación subclases, subclases y subclases, terminan por reducirse a un número muy limitado de ejemplares. A fin de cuentas, un objeto o un sistema bien definido puede ser rarísimo o incluso único en una galaxia. Por ejemplo, en una galaxia se encuentran estrellas un millón de veces más brillantes que el Sol. Pero estas estrellas luminosas son raras, en una galaxia quizá no haya más que una docena.

En resumen, la unidad de las leyes microscópicas, la unidad de las leyes que describen los objetos astronómicos no impiden, por el juego de diferencias, entre los parámetros (época de formación, masa de las estrellas, rotación, multiplicidad), la manifestación de diferencias que en una galaxia acaso lleguen a un caso excepcional.

Existen unas fuerzas en el origen de las estructuras. La primera de ellas es la fuerza debida a la gravitación y acabamos de ver las estructuras que engendra. Pero el término *fuerza* se ha generalizado a toda acción que crea una desviación en el equilibrio termodinámico. Un flujo de calor, un campo eléctrico o un campo magnético actúan como fuerzas. Desde el momento en que existen reacciones químicas, otras fuerzas, en el sentido usual del término, pueden favorecer tal o cual reacción antes que cualquier otra (por ejemplo, la acción de un catalizador) y, con preferencia sobre las demás, dar lugar a una estructura. De manera general, la producción en orden se realiza a expensas de la producción simultánea y, en distinto nivel, de un desorden aumentado. Las estructuras que aparecen dependen de las condiciones físicas de su formación. Unas pequeña[s] diferencias en las condiciones físicas pueden acarrear consigo considerables diferencias morfológicas en un nivel macroscópico. Las leyes microscópicas universales no impiden, dado el caso, la aparición a gran escala de formas insólitas o incluso únicas.

Llamando la atención sobre la forma según la cual un sistema finito (de extensión finita, con un número finito de núcleos atómicos), pero no aislado, puede producir «objetos» excepcionales, queremos señalar lo difícil y delicado que es abordar el problema del origen de la vida y de la evolución de los seres organizados. Es preciso considerar un gran número de sistemas idénticos para que la aparición de estos «objetos» excepcionales pueda ser objeto de un análisis estadístico. Ahora bien, en el caso de la aparición de la vida, por el momento, no tenemos más que un único caso que haya que considerar: el de la Tierra. Todas las especulaciones, todos los razonamientos a partir de este caso único, pues, deben realizarse con precaución.

Con esta puesta en guardia concluiremos esta primera parte sobre la universalidad de las leyes de la naturaleza y la aparición universal de mundos habitados: acaso la vida en el Universo no sea excepcional sino que, revestida de formas variadas, inesperadas, imprevisibles, sea, por el contrario, increíblemente frecuente en el Universo.

II. ¿DÓNDE Y CÓMO?

PRESENTACIÓN

Hemos llegado al momento en que resulta forzoso aportar los datos astronómicos básicos, necesarios para comprender en qué contexto se plantea el problema de la pluralidad de los mundos habitados y se elaboran las especulaciones sobre las civilizaciones extraterrestres.

Es preciso que expliquemos la formación de las estrellas, situar la Galaxia y al hombre en el Universo, describir la formación de los elementos, presentar el estado actual de las hipótesis cosmogónicas. En fin, describir la evolución del sistema solar tal como se la entiende hoy día.

Estos elementos resultan indispensables para abordar la cuestión del origen de la vida y de la evolución de todos los seres organizados.

Parece verosímil que las condiciones físicas de la superficie de un planeta sean decisivas a este respecto. Tales condiciones dependen de las propiedades de la estrella central, de la composición de la nebulosa primitiva y de propiedades de los planetas tales como su masa y su distancia respecto de la estrella central.

Las distancias entre las estrellas y, más aún, las distancias entre las galaxias, desempeñan evidentemente un papel fundamental en la comunicación interestelar. Preguntarse *dónde* y *cómo* pueden nacer las civilizaciones es también considerar la inmensidad del Universo y la profusión de galaxias, es decir, las extremas dificultades de comunicación y la eventualidad de una multitud continuada de civilizaciones.

LA FORMACIÓN DE LAS ESTRELLAS

Las reservas de energía de las estrellas no son limitadas. La consumición de los «combustibles» deja «cenizas». Por consiguiente, una estrella *evoluciona*.

La primera evidencia proviene de la observación de las estrellas, de la extraordinaria cantidad de energía que irradian. Una estrella de la misma masa que el Sol, al cabo de unos 10.000 millones de años, experimenta un cambio importante bajo el efecto de la acumulación de «cenizas» en las regiones centrales. En tal momento, tras unas decenas de millones de años, la estrella se dilata y se convierte en estrella gigante cuyo radio es cien veces mayor que el de la estrella inicial. Este mismo fenómeno se produce más rápidamente en las estrellas con más masa; el momento evolutivo crucial se origina de acuerdo con la siguiente proporción:

— para una estrella de 1 masa solar hacia los 10.000 millones de años,
— para una estrella de 2 masas solares hacia los 600 millones de años,
— para una estrella de 4 masas solares hacia los 40 millones de años,
— para una estrella de 8 masas solares hacia los 2,5 millones de años, etc.

Comparado con la edad de la Galaxia, del orden de los 10.000 millones de años, un intervalo de tiempo de aproximadamente un millón de años es muy corto: es comparar 8 segundos con 24 horas. Cuando se observa una estrella de 8 masas solares, se trata en cierto modo de una estrella que acaba de nacer. Ahora bien, estrellas semejantes no son raras.

Así pues, existe en la Galaxia un gran número de estrellas que acaban de formarse, de lo que inmediatamente se deduce que hay estrellas que se están formando ante nuestra vista.

¿Cómo se forman las estrellas? La observación nos revela que las estrellas muy jóvenes se presentan en grupos. Parece, pues, razonable que haya que buscar «nidos» de formación de estrellas. Pero ¿en qué estado se encuentra la materia preestelar? En este punto, el razonamiento viene a ayudar a la observación directa, hoy todavía defectuosa.

Se admite que la gravitación concentra la materia para hacer con ella estrellas. Partiendo de materia difusa, la gravitación contrae nubes inmensas que se fragmentan en nubes más pequeñas y más densas que paulatinamente se transforman en estrellas. Las observaciones con rayos infrarrojos nos revelan la existencia de condensaciones que concentran algunas masas solares, inmensas en gigantescas formaciones nubosas. Todo lleva a creer que estas condensaciones son embriones de estrellas.

¿Pueden ponerse números a este esquema? ¿Cuántas estrellas nacen actualmente cada año en la Galaxia? Podemos hacer algunas estimaciones a partir de los datos que facilita la observación.

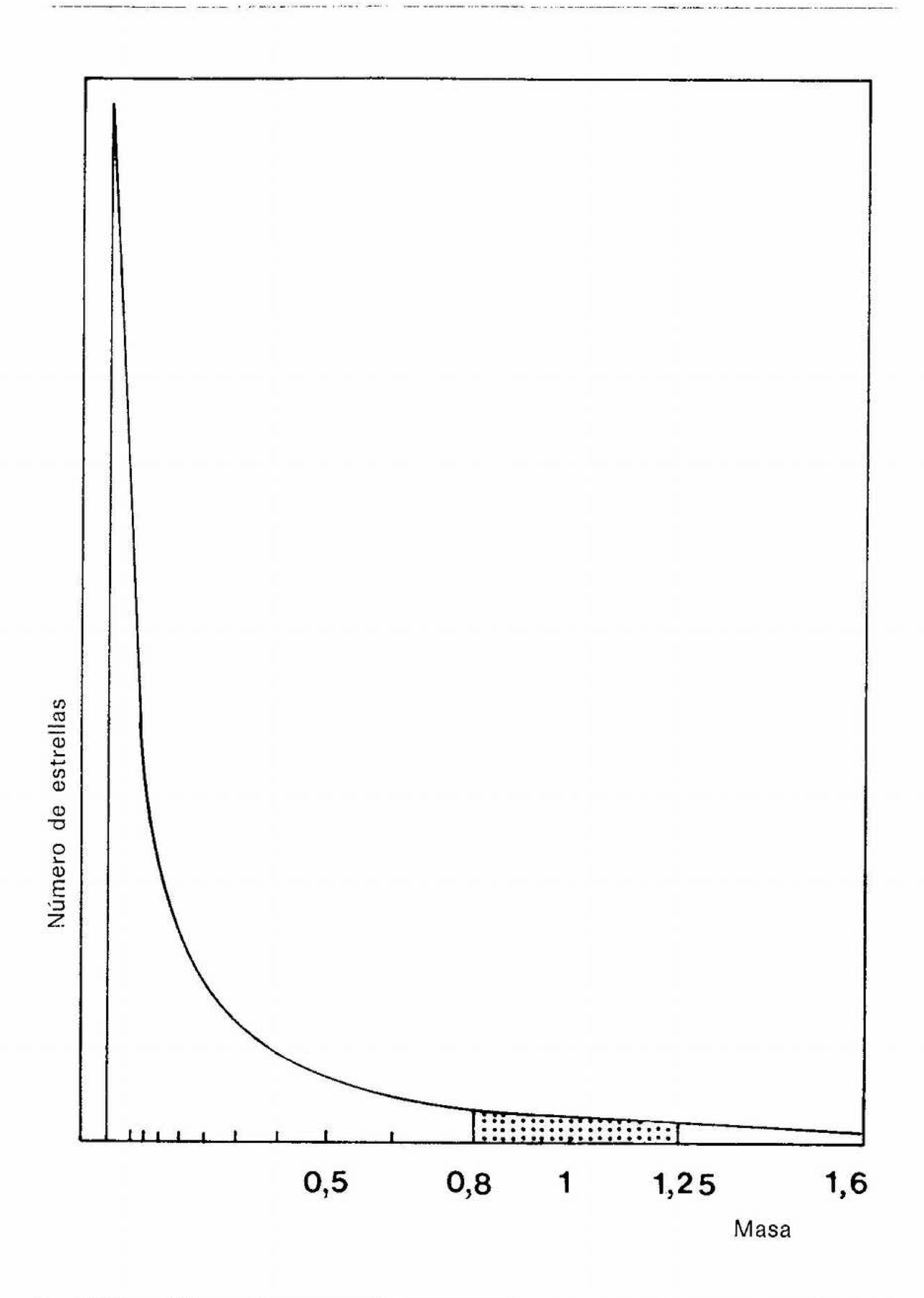
Dos cantidades son importantes:

— La primera es el número de estrellas de acuerdo con su masa. Tendremos necesidad de este dato para estimar el número de estrellas que posean una masa cercana a la del Sol. En cuanto a la formación de las estrellas, en el momento actual se estima que ante todo se forman estrellas de pequeña masa; solamente el 0,8 % de la materia va a formar estrellas de masa comprendida entre 0,8 y 1 de masa solar, y apenas el 0,7 % origina estrellas entre 1 y 1,25 de masa solar. La figura 2 proporciona una idea de la repartición del número de estrellas por intervalo de masa; las más pequeñas tienen aproximadamente 0,06 de masa solar.

— La segunda es la cantidad total de materia que se transforma en estrellas cada año a expensas de la materia interestelar. El recuento de estrellas en los sistemas de edad conocida (por ejemplo, la nebulosa de Orión) permite evaluar la cantidad de materia interestelar transformada en estrellas anualmente en toda la Galaxia: se encuentran algunas masas solares (de 4 a 20) por año.

La tasa E de formación de estrellas no ha sido en verdad constante desde la formación de la Galaxia ni tampoco uniforme a través de toda la misma. El estudio de las galaxias espiroideas vecinas nos indica sin lugar a dudas que la tasa de formación de estrellas no es la misma en las regiones centrales que en las regiones periféricas de una galaxia. Esto es igualmente cierto en la nuestra.

Estos datos que resultan de la observación son fáciles de comprender suponiendo un decrecimiento regular de la tasa de formación de estrellas desde la formación de la Galaxia. Todas estas consideraciones, más bien cualitativas que cuantitativas, permiten estimar sólo la tasa media de formación de estrellas en la Galaxia y tener



una idea de su variación en el transcurso del tiempo. Recordemos la tasa mencionada anteriormente de 4 a 20 masas solares por año en la Galaxia. Esta tasa debió de ser unas dos veces mayor hace 10.000 millones de años, cuando la Galaxia acababa de formarse. La tasa actual E es del orden de 16 a 80 estrellas nuevas que se originan cada año en la Galaxia. Una tasa E igual a 20 es un buen orden de magnitud, al que nos referiremos más adelante.

DIGRESIÓN EXTRAGALÁCTICA: LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

Según ya hemos visto, las galaxias se cuentan por miles de millones: basta con mirar lo bastante lejos. En una esfera de dos mil millones de años-luz a nuestro alrededor hay aproximadamente diez mil millones de galaxias. A la distancia adecuada, es lógico que se observen galaxias mucho más jóvenes que la nuestra, teniendo en cuenta el tiempo de propagación de la luz.

Nos encontramos aquí con uno de los problemas más apasionantes de la astronomía moderna, el que con toda seguridad haya suscitado más polémicas: el problema de la expansión del Universo. Para nosotros es como el desenlace natural del problema de la formación de las estrellas. Pero demostraremos que no es posible remontarse indefinidamente en el tiempo, ya que topamos con el problema de la formación de las galaxias. A su vez, este proceso se encuentra íntimamente relacionado con la evolución temporal del Universo y con su estructura a gran escala. La cuestión principal es, pues, la expansión del mismo.

El hecho dominante lo constituye el *desfase hacia el rojo de las rayas espectrales* de la radiación que proviene de objetos alejados; *este desfase aumenta con la distancia*.

◄ **Fig. 2.** Número de estrellas por intervalo de masas, en función de la masa. Se admite que las estrellas tienen una masa superior al 0,06 de la masa solar y que su número por intervalo de masa decrece aproximadamente con un factor 0,4 cuando la masa se duplica. Esto corresponde en torno al 1 % de las estrellas en el intervalo «adecuado» de masa para permitir la aparición de una civilización extraterrestre sobre un planeta del tipo de la Tierra.

Tratemos de ser claros para el lector atento que huye de la jerga de los especialistas.

La comparación no es por sí misma una justificación, pero en ocasiones una imagen simplificadora aclara las dificultades (1).

Suponga que me encuentro a la orilla de un río de corriente lenta y tranquila, y a intervalos regulares, por ejemplo cada segundo, lanzo una hoja seca que se va alejando arrastrada por la corriente. Si la corriente es de un metro por segundo, de esta manera creo una fila de hojas secas separadas las unas de las otras por distancias de un metro.

A 100 metros de allí, mi amigo Z, inmóvil, ve llegar la hilera de hojas secas y las ve pasar a razón de una hoja por segundo. De repente, Z comienza a andar hacia mí. Sube el río, en dirección contraria a las hojas y las ve pasar con más frecuencia que antes. Si él anda a la velocidad de un metro por segundo (3,6 km/hora) su velocidad y la de la corriente se suman y las hojas, separadas las unas de las otras por un metro, parecen desfilar a razón de una hoja cada 1/2 segundo: la frecuencia aparente aumenta en el sentido contrario de la corriente.

Z se detiene. Yo sigo alimentando la hilera de hojas. De nuevo Z ve pasar las hojas a razón de una hoja por segundo.

Z vuelve a caminar en sentido inverso, primero lentamente, a razón de 1/2 metro por segundo (1,8 km/hora). Esta vez las hojas discurren con más lentitud, una hoja cada dos segundos; la velocidad de Z se resta de la corriente. A continuación Z camina a la velocidad de la corriente, un metro por segundo. Avanza al mismo tiempo que la corriente y se encuentra siempre a la altura de la misma hoja. Ya no ve pasar las hojas. El intervalo de tiempo entre el paso de dos hojas se ha convertido en infinito. Si Z caminase a razón de 0,99 metros por segundo, vería pasar las hojas muy lentamente, a razón de una hoja cada 100 segundos.

Este tipo de fenómenos es muy conocido por los conductores de automóviles. En una autopista donde todo el mundo circulase a 130 km por hora, nunca le adelantarían a uno y nunca se adelantaría a nadie, pero basta con reducir la velocidad o detenerse para ver de repente cómo todos los vehículos se suceden con una rápida frecuencia que era insospechada mientras antes se iba circulando. De la misma forma, parece que los vehículos de la vía opuesta se precipitan hacia nosotros con una elevada frecuencia cuando circulamos, mientras que ésta desciende bruscamente en el momento que nos detenemos.

La frecuencia de un fenómeno periódico (la sucesión de las hojas en el agua) depende, pues, de la velocidad de propagación del fenómeno y de la velocidad relativa del origen y del observador. Cuando se trata del sonido o de la luz, el fenómeno del cambio de frecuencia se denomina «efecto Doppler-Fizeau».

Cuando se trata de la luz, el desfase hacia las grandes longitudes de onda, el «enrojecimiento», significa que el movimiento del origen aleja a éste del observador; el desfase hacia las longitudes cortas de onda significa que el origen se aproxima al observador (el enrojecimiento corresponde a una disminución de frecuencia; el azulado corresponde a un aumento).

No es posible mantener hasta el final la comparación entre la luz y la sucesión de hojas secas a lo largo del río. En especial porque mientras nuestro paseante Z puede alcanzar y adelantar la corriente, nosotros no podemos correr tras la luz, alcanzarla y adelantarla. Según Infeld (1950) (2), Einstein contaba a menudo que a partir de los 15 ó 16 años «se rompía la cabeza para saber qué ocurriría si un hombre tratase de alcanzar un rayo luminoso. Durante años, había reflexionado sobre este problema específico. Tratando de resolverlo, llegó a la teoría de la relatividad».

El desfase de las rayas espectrales ha sido observado en todas las frecuencias, desde el campo de las ondas de radio hasta el del lejano ultravioleta. En una misma galaxia, el cambio relativo de frecuencia es el mismo en todas las longitudes de onda. La explicación más sencilla es que se trata de un efecto Doppler y que consiguientemente *las galaxias se alejan de nosotros*.

La determinación de la escala de distancia es una cuestión complicada. Por decir las cosas de manera aproximada, una galaxia parece tanto más débil cuanto más alejada está. Escogiendo galaxias «tipo» se puede establecer la relación entre el brillo y la distancia. Se deduce entonces que la velocidad de huida de las galaxias aumenta en 25 kilómetros por segundo cada millón de años-luz.

LA FÍSICA DE LA EXPANSIÓN*

Para nuestro tema son importantes dos propiedades físicas del Universo en expansión. Una es la que acabamos de mencionar, la

* El lector exigente encontrará explicaciones más detalladas en el apéndice A2.

expansión propiamente dicha. La otra se debe a un extraordinario hallazgo de Penzias y Wilson en 1965: el descubrimiento de la radiación del fondo del espacio.

Mientras buscaban determinar el origen de las ondas de radio decimétricas que provienen del espacio, Penzias y Wilson descubrieron que una vez retiradas las contribuciones de la atmósfera terrestre, del entorno planetario y de la Galaxia, quedaba un débil componente isótropo, de igual intensidad en todas las direcciones. Medidas complementarias en otras longitudes de onda permitieron afirmar con prontitud que se trataba de una radiación de naturaleza térmica, la misma que se hallaría en el interior de un recinto cerrado cuyas paredes estuviesen a la temperatura de 2°72 absolutos (aproximadamente −270° Celsius).

Al remontarse hacia el pasado, se retrocede en sentido contrario al de la expansión del Universo. Se puede, pues, imaginar que el Universo fue mucho más denso en el pasado. Al mismo tiempo, es dado suponer que la radiación del fondo del espacio se comprime y se engendra una radiación cada vez más caliente.

Remontándose lo bastante lejos en el pasado, se llega a una época en la que no podían existir ni estrellas ni galaxias. Se cree entonces que la formación de las galaxias comenzó cuando la densidad del Universo era mil millones de veces mayor que hoy (sin embargo, sólo de 100 átomos de hidrógeno por centímetro cúbico) y la temperatura mil veces más elevada (no superior, pese a todo, a 3.000°).

Así, es posible retrotraerse cada vez más remotamente en el pasado, hasta llegar al origen de los elementos (ver la sección siguiente) (3).

EL ORIGEN DE LOS ELEMENTOS

La época en que $t = 1$ segundo parece de todo punto arcaica. Ha dejado, sin embargo, señales casi irrefutables.

De hecho, estas señales se manifiestan en los núcleos de los átomos y, sobremanera, en la relativa abundancia de helio y de hidrógeno en el Universo.

Hemos visto (pág. 20) que los mismos átomos estaban presentes por doquier en el Universo. Pero el análisis de la luz de las estrellas no se limita a esta constatación. Los astrónomos *miden* el número de átomos presentes y llegan a establecer una tabla de la composición química de las estrellas, de la Galaxia e, incluso, de las galaxias vecinas.

El resultado más sorprendente de estas medidas es el que se explica. En esencia, la Galaxia e incluso las galaxias vecinas están constituidas por 3/4 de hidrógeno y 1/4 de helio. Todos los demás elementos reunidos constituyen menos del 2 % de la materia del Universo. La Tierra, que no contiene más que una cantidad muy pequeña de hidrógeno (en el agua de los océanos) y todavía menos de helio, no es en absoluto característica de la abundancia de estos elementos. Es como un pedrusco, en medio de los gases. En el transcurso de la formación del sistema solar y de la Tierra, toda una serie de mecanismos de separación de los elementos provocó la eliminación sobre la Tierra de la mayor parte de los gases ligeros, hidrógeno y helio, que es seguro estaban presentes en la nebulosa primitiva y que lo están también en el Sol.

Parece que el helio es en todas partes aproximadamente igual de abundante que en un principio, habida cuenta de la producción de helio en la Galaxia desde su formación. Esta uniformidad de composición química del Universo es muy difícil de explicar por los mecanismos de actuación local. Ahora bien, la expansión del Universo tiene una explicación simple e inmediata de esta uniformidad en la abundancia de helio.

En la proximidad de la época en que $t = 1$ segundo, cuando la temperatura se cifraba en unos 10.000 millones de grados, hidrógeno y helio podían convertirse el uno en el otro:

$$4\ \mathrm{H} \rightleftharpoons \mathrm{He}$$

El rápido enfriamiento durante el transcurso de la expansión detuvo las reacciones entre los núcleos y, muy pronto, tras menos de un minuto, la composición química primordial del Universo se quedó fijada.

Esta descripción de la formación primera de los elementos presenta cierto número de aspectos atrayentes. Lo que resulta de los datos de la observación es: expansión del Universo, densidad de la materia, radiación del fondo del espacio, homogeneidad e isotropía en gran escala, todo ello *sin añadidura de hipótesis suplementaria alguna*. Esta explicación obedece de forma clara al principio de economía conocido bajo el nombre de *navaja de Ockham*: *no introducir ninguna entidad nueva si no hay necesidad*.

Los modelos que describen la formación de los elementos per-

miten principalmente, ya lo hemos dicho, explicar el valor universal de la abundancia de helio. Pero los elementos más pesados son muy difíciles de formar. En especial, a partir del carbono, la abundancia que se calcula es, todo lo más, de una parte por cada billón de partes de hidrógeno. La diferencia con la cantidad que se observa en estrellas como el Sol es enorme: un factor de varios miles de millones. De esto se concluye que entre la formación de los elementos y la formación de las estrellas se produjo una etapa intermedia, cuya existencia sólo sospechamos en la hora actual.

LA UNIDAD DEL UNIVERSO

La unidad del Universo, tal como permite deducir su composición química y el modo de formación de los elementos ligeros (hidrógeno, helio), sin duda tiene razones físicas profundas, que buen número de físicos se afanan en la actualidad por hallar.

El problema suscitado aquí no posee más que un enlace filosófico con nuestro tema. Pero puesto que la investigación de las civilizaciones extraterrestres está inspirada en la idea de unidad del Universo, toda cuestión importante relativa a esta idea merece al menos ser evocada.

La teoría del origen de los elementos suscita una cuestión planteada ya por la isotropía de la radiación del fondo del espacio y que hace intervenir una noción esencial: la de causalidad.

Se dice que dos regiones separadas por un intervalo de longitud L y un intervalo de tiempo t están unidas causalmente si la distancia L puede recorrerse a la velocidad de la luz en un tiempo inferior a t:

$$L < c\, t$$

La relación $L = c\, t$ define el cono de luz en cuyo interior dos acontecimientos pueden estar unidos causalmente.

En un Universo en expansión, a partir del punto P, en la fecha t_0, se puede construir el «cono» de dependencia que define el campo del Universo que haya engendrado las condiciones reinantes en (P, t_0) (fig. 3). Este «cono» se estrecha cuando se llega cerca del origen, restándose el efecto de la expansión y de la velocidad de la luz. La intersección con la superficie $t = t_0$ define el campo unido causalmente que ha influido en la época t_0.

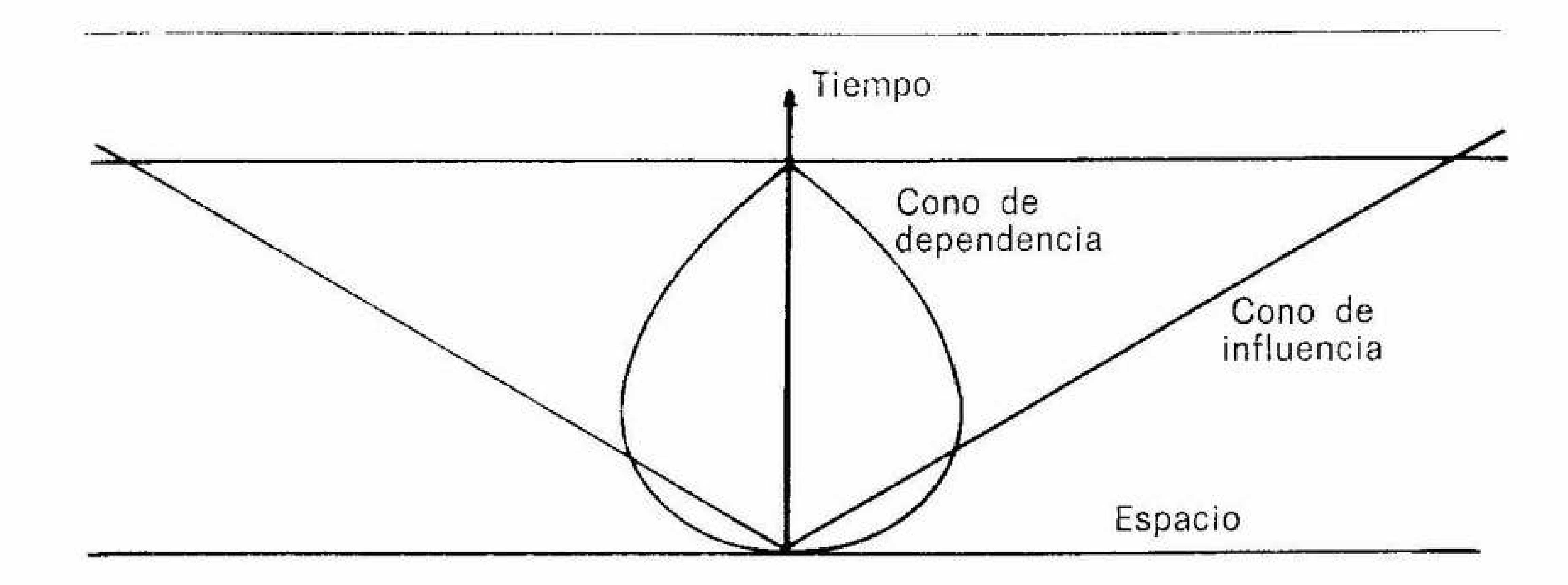


Fig. 3. A partir de un punto en la fecha t_0, puede construirse el «cono» de dependencia. Este «cono» se estrecha cuando se llega cerca del origen, por efecto combinado de la expansión y de la velocidad de la luz, «remontando» el tiempo cada vez con más dificultad. La intersección con el cono de influencia que se expande a partir del origen define el campo enlazado causalmente que ha influido en la situación en P en la fecha t_0.

Si se toma por t la fecha $t_0 = 1$ segundo, se encuentra que la masa de materia unida causalmente a $t_0 = 1$ segundo no excede a 1/400 de masa solar.

¿Cómo, pues, un Universo hecho de una infinidad de regiones causalmente distintas, cada una de ellas sin exceder 1/400 de masa solar, ha podido engendrar una composición química tan sobremanera uniforme, a menos que la constitución de él mismo hubiera sido previamente uniforme?

Se trata de una cuestión en verdad esencial que, así parece, atañe a los propios fundamentos de la física. En los últimos años se han desplegado esfuerzos considerables a fin de ofrecer una respuesta. Cabe pensar que la relación causal entre las diferentes partes del Universo se haya urdido en una época en extremo arcaica. Acaso la solución de este problema esté relacionada con la gran tarea que se mencionó anteriormente: la *gran unificación* de todas las fuerzas de la naturaleza, realizada mediante la unidad de lo microscópico y de lo macroscópico, de las partículas y del Universo (4).

FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAS GALAXIAS

La Galaxia contiene estrellas viejas, quizá casi tan viejas como la propia Galaxia. Es factible calcular la abundancia de elementos

en ellas, del mismo modo como se calcula la abundancia de elementos en el Sol.

En estas estrellas la proporción de helio es sensiblemente la misma que en el Sol, pero la proporción de metales es radicalmente distinta. Puede llegarse a datar la formación de las diferentes familias de estrellas y saber así cómo varió esta proporción de metales. Desde el nacimiento de la Galaxia, la cantidad se multiplicó por mil, al igual que, así parece, se multiplicó la cantidad de carbono.

En las estrellas más viejas, la abundancia de carbono en relación con el hidrógeno es del orden de una parte por un millón. Cuando se calcula la cantidad de carbono producido al comienzo de la expansión del Universo se halla una cantidad un millón de veces más reducida.

Resulta difícil huir de la idea de que la formación de las galaxias fue acompañada por la aparición de una primera generación de estrellas, hoy día desaparecidas, que, en cierto modo, sembraron la Galaxia de elementos medianos y pesados (como el carbono de hierro), lo cual habría permitido la aparición de una segunda generación de estrellas cuyos restos vemos en la Galaxia bajo la forma de estrellas viejas (llamadas estrellas del halo, fig. 4).

Estas estrellas viejas manifiestan signos de la época de su formación: déficit en carbono, oxígeno, nitrógeno y elementos pesados.

Más adelante hablaremos del modo de formación de los planetas (página 48). Ahora digamos tan sólo que para formar un planeta como la Tierra a partir de una nebulosa que contenga la composición química de este planeta hacen falta 400 veces su masa. Con una deficiencia de un factor mil en relación con el Sol, se precisaría 400.000 veces la masa de la Tierra, es decir, de hecho, una masa igual a la masa del Sol. Parece excluida la formación de pequeños cuerpos sólidos que posean la masa de la Tierra a partir de masas tan grandes de gas. En una nebulosa en rotación, tan pobre en elementos pesados, carbono, oxígeno, silicio y metales, más bien cabe esperar la formación de una estrella doble.

Por consiguiente, parece poco probable que las estrellas muy viejas posean un sistema planetario y creo que es preciso abandonar la idea de civilizaciones extraterrestres que pasen de los cinco mil millones de años.

La evolución de las estrellas conduce a la formación de carbono y de metales, lanzados a continuación por toda la Galaxia. Las nuevas estrellas se originan entonces en un medio rico en carbono y en metales. Esta evolución de la composición química de la Galaxia

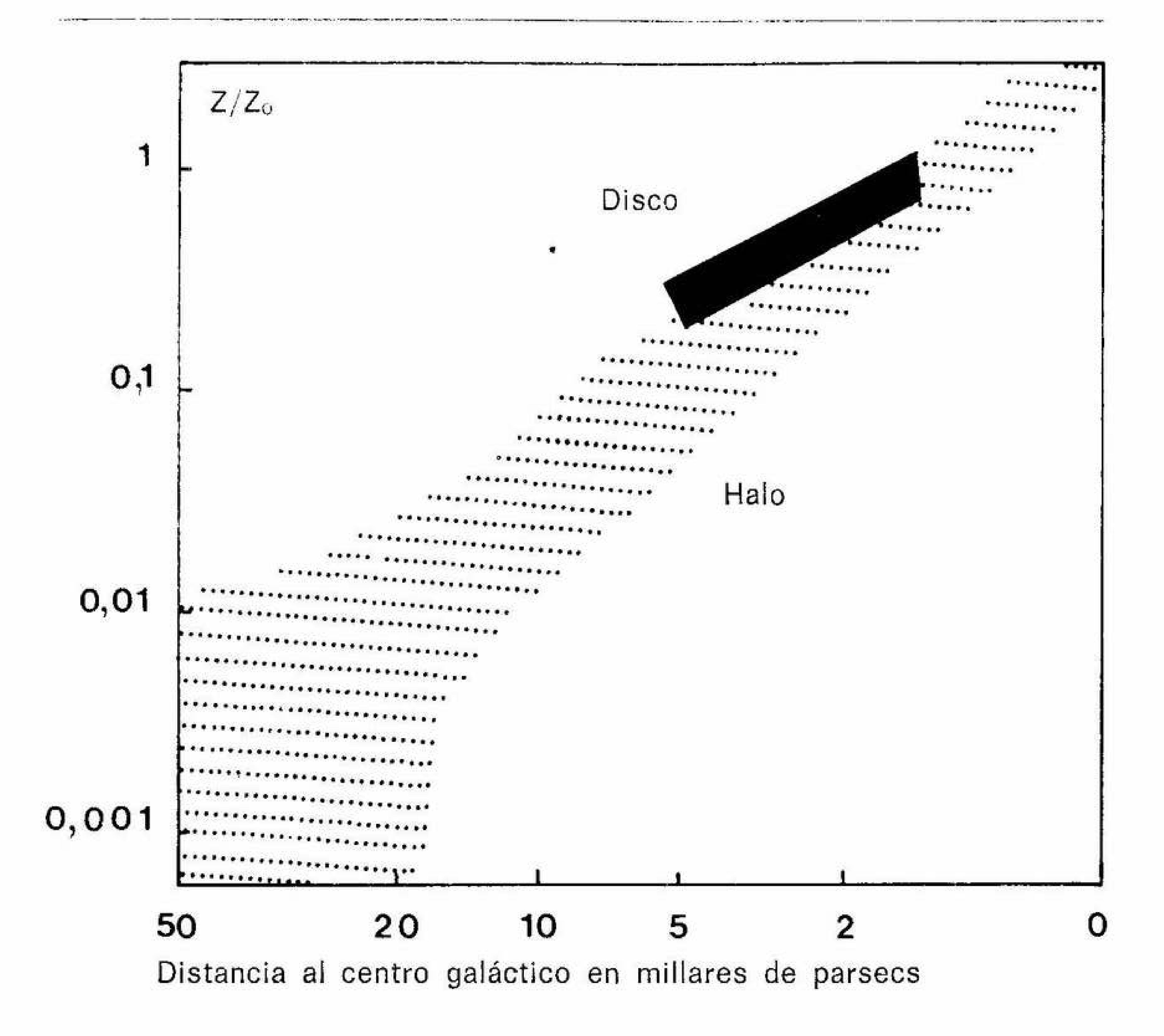


Fig. 4. *Composición química de las estrellas en la Galaxia.* Generalmente las estrellas del halo son pobres en carbono, oxígeno y metales.

es un fenómeno importante, el cual merece la mayor de las atenciones.

En primer lugar, la observación nos revela que la composición química de las galaxias no es uniforme. Esto significa que, a pesar de los violentos movimientos que agitan el medio interestelar, la mezcla entre elementos no es suficiente para convertir en uniforme la composición química de una galaxia. Esta conclusión es válida también para la nuestra.

El mecanismo principal a través del cual la Galaxia se enriqueció en hierro se debe a la explosión de las supernovas. El desmoronamiento y probablemente la completa dispersión de una estrella

—fenómeno colosal— liberan en 3 meses la misma cantidad de energía que el Sol irradiaría en diez mil millones de años. La explosión de una supernova va acompañada de la expulsión a gran velocidad (5.000 km/segundo) de grandes masas de gas ricas en metales, en particular hierro. La Galaxia se enriquece así de una cantidad de hierro del orden de una masa solar por siglo. Cuando se produce la expulsión, esta masa de gas, detenida por la materia ya presente en el espacio interestelar, disminuye su velocidad progresivamente. Al cabo de 100.000 años y de un recorrido de 30 años-luz, pierde su individualidad y comienza a ser arrastrada por los movimientos a gran escala del gas interestelar. Continúa la mezcolanza, pero esta materia se recicla en estrellas antes de haber tenido tiempo de quedar encadenada lejos de su lugar de formación.

Una propiedad importante de los productos expulsados por las supernovas es la presencia de elementos radiactivos (uranio, torio y otros). En la superficie de la Tierra y en los meteoritos se encuentran restos de estos elementos radiactivos y de sus productos de desintegración.

La abundancia relativa de elementos radiactivos y de sus productos de desintegración dependen de la fecha de formación de los elementos radiactivos (5). De hecho, tal como muestra la relación renio 187/osmio 187, existe una formación continua de elementos radiactivos, y puede estimarse durante cuánto tiempo ha funcionado la nucleosíntesis antes de la formación del sistema solar: aproximadamente 9.000 millones de años.

Por otra parte, la presencia de yodo 129, que con una duración de vida de 25 millones de años se transforma en xenón 129, indica una contaminación de la materia interestelar unos cien millones de años antes de la formación de la nebulosa primitiva. Ahí se tiene al menos un índice del intervalo que puede transcurrir entre la explosión de una supernova y la formación de una estrella.

La lentitud con la que la materia surgida de una supernova se redistribuye en la Galaxia y los retrasos que pueden producirse entre la explosión de una supernova y la formación de una estrella (y de un sistema planetario) hacen suponer que son posibles grandes fluctuaciones en cuanto a la composición química de los diversos campos de formación de estrellas. La tasa de formación de estrellas depende de la composición química. La observación de la galaxia de Andrómeda en ultravioleta revela la existencia de un brillante anillo de estrellas de 15.000 años-luz de radio. En nuestra Galaxia se ha reconocido igualmente un anillo semejante de estrellas con aproximadamente el mismo radio. En esta región, la composición química y la distribución de las masas de estrellas no son las mismas que en el entorno solar.

Restricciones en cuanto a la aparición de la vida

Volvemos de nuevo a uno de los elementos del problema que es objeto de este libro. Es muy probable que la formación de los planetas y, por consiguiente, la aparición de la vida estén unidas a la abundancia de elementos químicos en la Galaxia. Esta composición varía con el tiempo, no es uniforme y sin duda presenta fluctuaciones apreciables de un lugar a otro, en especial en lo que respecta a unos elementos no detectables por su espectro, pero cuya importancia es esencial en la constitución y evolución de los planetas: los elementos radiactivos. No podemos más que realizar conjeturas acerca de las restricciones que estas fluctuaciones de composición química imponen a la aparición de la vida:

1. Una cantidad más reducida de oligoelementos puede hacer más difícil la aparición de las primeras moléculas biológicas.
2. Una cantidad un poco mayor de elementos radiactivos puede modificar sensiblemente la historia térmica del planeta. En la actualidad en torno al 10 % del flujo de calor que abandona la Tierra posee un origen radiactivo, el resto es radiación solar que se reenvía al espacio en forma de infrarrojos. La radiactividad está en el origen del aumento de temperatura a medida que se penetra en la corteza terrestre (aproximadamente 1° cada cien metros) y por consiguiente de la fluidez del magma sobre el que flotan las placas continentales. Hace cinco mil millones de años, en el momento de la formación de la Tierra, el flujo de calor que provenía de los elementos radiactivos era aproximadamente tres veces mayor, la temperatura del magma sensiblemente más elevada y, sin duda alguna, tanto la actividad volcánica como la velocidad de movimiento de las placas continentales eran también superiores. Con un poco más de radioelementos, un planeta primitivo del tipo de la Tierra tendría durante mucho más tiempo una actividad térmica mayor. Esto puede añadir restricciones suplementarias a la aparición de la vida y a su desarrollo y, si se trata de las condiciones de aparición de la catástrofe térmica (de la que hablaremos más adelante, página 61), volverla en su caso inevitable.

FORMACIÓN DE SISTEMAS PLANETARIOS

Podemos *afirmar* que *en la actualidad* se forman estrellas. ¿Qué puede decirse sobre los sistemas planetarios? Poca cosa, en verdad, en tanto que la hipótesis de la existencia de otros planetas en la Galaxia se halla en el seno del problema de las civilizaciones extraterrestres. Nosotros conocemos *un* sistema planetario: el nuestro; conocemos alrededor de Vega un disco de gas y cenizas de grandes dimensiones (ver más adelante) que tal vez sea una nube protoplanetaria; entre las 107 estrellas más cercanas hay 17 discos probables candidatos... y un compañero infrarrojo débil de la estrella recientemente* formada T Tauri (6).

Todo esto es poco, muy poco. Sin embargo, los datos de observación y las leyes de la física permiten hacerse una idea ajustada de las condiciones de formación de un sistema planetario.

El empleo riguroso de las leyes físicas permite sobre todo eliminar los guiones fantásticos donde, por ejemplo, son transgredidas las grandes leyes de conservación y permite plantearse asimismo ciertas cuestiones importantes para la comprensión de los mecanismos de formación del sistema solar.

Partimos del sistema solar. *Tres rasgos esenciales* son los siguientes:

1. Las órbitas de los planetas (con excepción de Plutón) están situadas en las proximidades de un plano que coincide casi por completo con el ecuador solar (el ecuador solar forma un ángulo de 7 grados con el plano de la eclíptica) (fig. 5).
2. Todos los planetas efectúan su revolución en el mismo sentido.
3. Las órbitas (con excepción de la de Plutón) son prácticamente circulares.

El movimiento de los planetas alrededor del Sol presenta casi una simetría de revolución. ¿Ha sido siempre así? Parece cierto que los planetas se encuentran demasiado alejados entre sí como para que las propiedades de su movimiento hayan sido básicamente dis-

* «Recientemente», quiere decir aquí algunos cientos de millares de años.

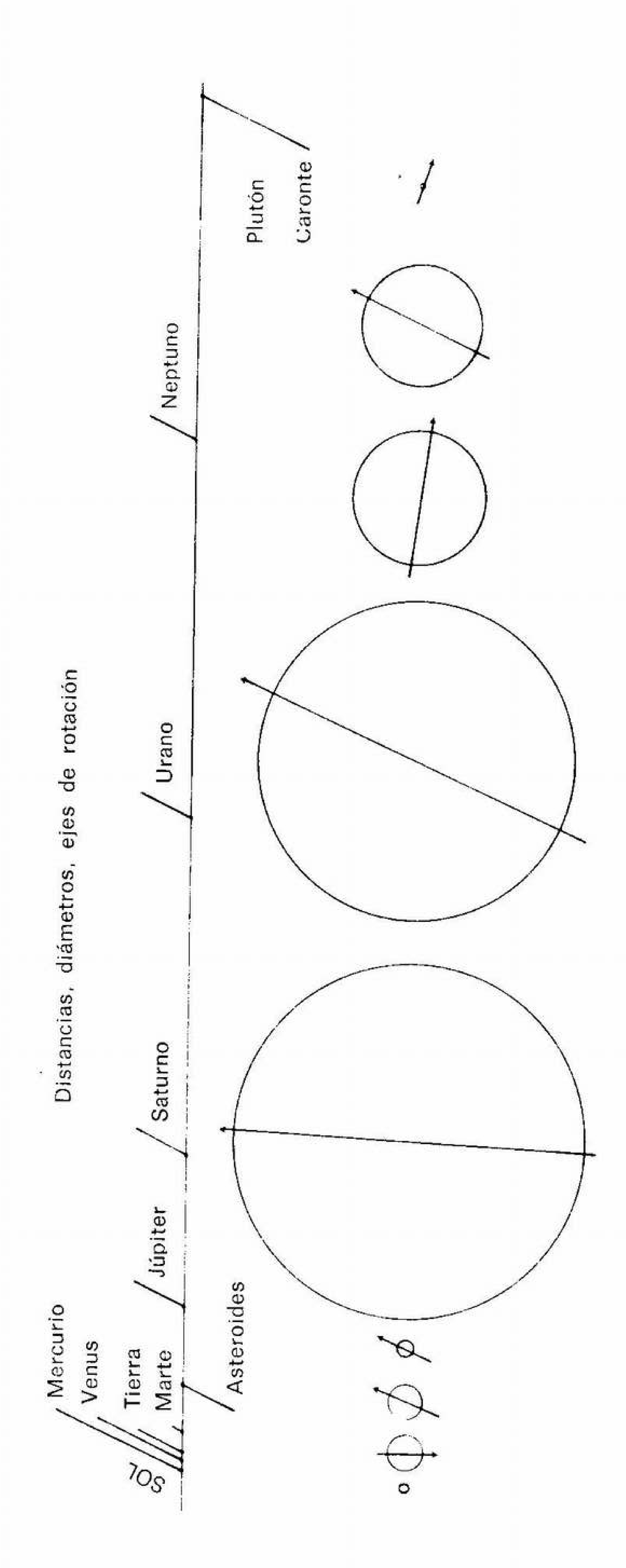


Fig. 5. Esquema del sistema solar e inclinación de los ejes de rotación de los planetas respecto al plano de la órbita terrestre.

tintas de lo que son en la actualidad. La inclinación de las órbitas de los planetas en su relación recíproca ha sufrido sin duda variaciones de débil amplitud, al igual que la excentricidad de las mismas. Pero, en esencia, es verosímil que las propiedades dinámicas generales de los planetas no hayan sido en lo fundamental distintas de las actuales. Si, por comparación con una serie de colisiones al azar, se trata de estimar el tiempo necesario para que la Tierra cambie apreciablemente de trayectoria, nos hallamos ante una duración muy larga, del orden de los diez mil millones de años.

El problema básico que entonces se plantea es el siguiente: ¿cuál es el origen de ese movimiento conjunto de los planetas, en el mismo plano, en el mismo sentido y en forma circular? Una formulación más antropomórfica sería la siguiente: ¿cómo han sido lanzados los planetas a sus órbitas? Las teorías cosmogónicas de Descartes, Kant y Laplace imaginan un disco de gas en rotación alrededor del Sol o formado junto con el Sol. Los ulteriores trabajos sobre la constitución y la estabilidad de un disco en rotación en torno al Sol han demostrado que, *efectivamente*, un disco de gas y cenizas podía haber existido alrededor de éste. Un problema interesante cuya importancia ya se reconoció a partir de mediados del siglo pasado es la lenta rotación del Sol —cubre un período de 27 días—, en tanto que la teoría de Laplace preveía un período de algunas horas. Volveremos a ello más adelante (ver pág. 54).

La cuestión siguiente es, por tanto, ¿cómo se han formado los planetas en el seno del disco? La respuesta a esta pregunta no puede surgir de la pura imaginación; ésta es la lección de Poincaré (*Lecciones sobre las hipótesis cosmogónicas*):

«Es imposible contemplar el espectáculo de un Universo pletórico de estrellas sin preguntarse cómo se ha formado: para buscar una solución tal vez deberíamos esperar a reunir pacientemente todos los elementos y de tal forma llegar a adquirir alguna esperanza de hallarla; pero si fuésemos tan razonables, si fuésemos curiosos sin impaciencia, es probable que jamás hubiésemos creado el estudio científico y que nos hubiésemos contentado con vivir nuestra limitada existencia. Así pues, nuestro espíritu ha reclamado imperiosamente esta solución mucho antes de que estuviese madura y cuando sólo poseía tenues indicios que más le permitían adivinarla que esperarla. Éste es el motivo por el que las hipótesis cosmogónicas son tan numerosas y variadas, por el que todos los días surgen noticias tan inciertas como plausibles, al igual que las teorías más antiguas, en medio de las cuales vienen a ocupar un lugar sin llegar a eclipsarlas.»

Los datos más recientes sobre los meteoritos imponen objeciones sumamente fuertes acerca de las condiciones que reinaban en la nebulosa primitiva y la velocidad a la que se realizaron las condensaciones.

Los meteoritos no son objetos homogéneos. Se trata de extraños conglomerados en los que coexisten formaciones que sufrieron transformaciones diversas junto con pepitas microscópicas, testigos de la propia nebulosa primitiva. En el caso del meteorito «Allende», que cayó en el norte de México en 1969, estas pepitas son aleaciones de elementos refractarios (molibdeno, osmio, iridio, rodio). Estas aleaciones que jamás se han encontrado en ninguna otra parte son indicadores preciosos de las condiciones de condensación en la nebulosa primitiva.

Los condritos nos aportan informaciones esenciales sobre esta nebulosa. Se trata de meteoritos constituidos por un conglomerado que contiene esferas micrométricas (cóndrulos) de diferentes minerales. En los condritos se encuentran glóbulos que provienen del enfriamiento de un mineral fundido, en el seno de una matriz hecha de fragmentos minerales con aristas agudas, lo cual indica un proceso de fracturas por colisiones.

El crecimiento de pequeños objetos (denominados *planetasimales*) a partir de las cenizas primitivas, su fragmentación por colisión, su agrupamiento de nuevo, parecen constituir el mismo proceso por el que se formaron los núcleos de los planetas gaseosos (típicamente Júpiter y Saturno) y los planetas primitivos.

Pero, ¿de dónde vienen las cenizas primitivas?

La condensación originaria tuvo lugar en los gases proyectados por las estrellas, sede ellas mismas de la nucleosíntesis de los principales elementos constitutivos de las cenizas (carbono, oxígeno, silicio, metales). En el «viento» estelar se hallan las condiciones de presión adecuadas para que esta condensación se produjese. La materia interestelar está demasiado enrarecida para que el crecimiento de los granos alcance el tamaño observado en los meteoritos.

La materia de la nebulosa primitiva, tal como lo atestiguan los meteoritos y, sobre la Tierra, la abundancia de isótopos del plomo, da trazas de una continua actividad de nucleosíntesis de los elementos radiactivos durante nueve mil millones de años, de una inyec-

ción continua en la materia interestelar de los elementos de base producidos en las estrellas y, finalmente, como ya hemos dicho, la traza de una última contaminación por restos de supernova hace 100 millones de años. Lo que es más sorprendente, pues, es la contribución de diversas fuentes de formación de los elementos a la constitución de la nebulosa primitiva. Se impone otra constatación al examen de los datos de la abundancia en los meteoritos: la heterogeneidad de la composición química de la nebulosa primitiva.

FORMACIÓN DE LOS PLANETAS

La composición química de los planetas, comparada con la composición del Sol, permite hacerse una idea de la masa mínima de la nebulosa primitiva: muy probablemente tenía la composición del medio interestelar, idéntica ésta a la del Sol. El empobrecimiento manifiesto en los gases ligeros (hidrógeno, helio) obliga a imaginar un mecanismo eficaz de expulsión de los excesos de gases (en contraste con la composición actual).

El balance es, pues, el siguiente:

Los planetas telúricos (Mercurio, Venus, la Tierra, Marte) tienen una masa total de 1,98 de masa terrestre (o sea, $6{,}6 \cdot 10^{-6}$ de masa solar). Para encontrar en la nebulosa primitiva el silicio y el hierro necesarios se requiere una masa 400 veces mayor, es decir 0,00264 de masa solar.

Júpiter y Saturno tienen una masa solar de 413 masas terrestres y la densidad de cada uno de sus núcleos es de unas 15 masas terrestres. La envoltura gaseosa tiene aproximadamente la composición solar, pero los dos núcleos unidos (sin duda compuestos en su mayor parte de hielo) exigen cada uno 1.500 masas terrestres en la nebulosa primitiva, es decir, un total de 3.500 masas terrestres, o sea, 0,0115 de masa solar.

Urano y Neptuno están casi reducidos a su núcleo y su materia es, respectivamente, de 1.300 y 1.600 masas terrestres, es decir 0,0096 de masa solar.

La masa de Plutón es desdeñable. Los planetas provienen, por tanto, de una nebulosa primitiva que tenía al menos 0,02 de masa solar.

¿Era más grande la masa de la nebulosa primitiva? Existen muchas razones para pensar que la nebulosa primitiva tenía una pequeña masa y que ésta era, como en el modelo cosmogónico de Laplace, el residuo de la formación del Sol (una nebulosa de gran masa habría dejado moléculas que no se encuentran en el sistema solar).

Bajo el efecto de la rotación, la nebulosa adopta la forma de una especie de disco de espesor calculable. Un componente de la gravedad, perpendicular al plano de simetría del disco, la mantiene unida y contrarresta a los movimientos desordenados de las moléculas de gas.

En cuanto a las cenizas, éstas caen hacia el plano de simetría del disco, allí donde la gravedad es nula. Al caer aumentan de tamaño por captura y forman granos de varios centímetros de diámetro.

Los tiempos de caída y de agrupamiento de los granos en el plano ecuatorial del disco es corto: sólo algunos millares de años.

Cuando los granos se agrupan así, construyen en el seno del disco de gas un disco de granos de un espesor muy reducido. La densidad de la materia en las proximidades del plano ecuatorial aumenta rápidamente hasta el momento en que la atracción recíproca de los granos, bajo el efecto de la gravitación, logra ventaja bajo los efectos estabilizadores del movimiento alrededor del Sol. Entonces se desencadenan unas situaciones de inestabilidad que agrupan los granos en masas mucho mayores. En las inmediaciones de la Tierra, se trata de conglomerados de unos 2 kilómetros de diámetro, de los que ya hemos hablado, los planetasimales. Estos planetasimales son objetos secundarios a partir de los que una serie de colisiones va a originar, por fractura y aglomeración, una nueva clase de planetasimales que poseen una gran distribución de masa. A partir de esta tercera generación de objetos se van a crear los planetas. La distribución de estos objetos de tercera generación evoluciona con el transcurso del tiempo, según acrecen los mayores de entre ellos por medio de la captura de los más pequeños. Así se constituyen los planetas telúricos (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) y los núcleos de los grandes planetas.

La última fase es la captura de gas por los núcleos sólidos ya formados. La masa sólida de los planetas telúricos es demasiado débil para haber agrupado masas importantes de gas, mientras que los corazones sólidos de los grandes planetas poseen un radio de acción gravitatoria lo bastante grande como para capturar y retener masas ingentes de gas.

En este mecanismo, existe una competición entre dos efectos. El primero es la velocidad a la que se agrupan los materiales del corazón sólido, velocidad que decrece con el alejamiento del Sol; el segundo es la velocidad a la que se dispersa del gas de la nebulosa primitiva bajo el efecto de gigantescas erupciones del Sol primitivo. La débil masa de gas agrupada por Urano y por Neptuno se debe a que la materia del corazón sólido se ha agrupado demasiado despacio para capturar una cantidad apreciable de gas que se escapaba con rapidez excesiva del sistema solar.

No olvidemos decir aquí, que estas gigantescas erupciones del Sol primitivo que han disminuido la velocidad de su rotación, son las que ponen de acuerdo el período actual de rotación (27 días) con la teoría cosmogónica (algunas horas).

LA ARMONÍA DE LAS ESFERAS

La distancia de los planetas con respecto al Sol se puede representar con una fórmula simple denominada «ley de Bode-Titius» (1772):

	Distancia	*Bode-Titius*
Mercurio	0,39	0,4 = 0,4
Venus	0,72	0,7 = 0,4 + 0,3
La Tierra	1	1 = 0,4 + 0,3 × 2
Marte	1,52	1,6 = 0,4 + 0,3 × 4
...		2,8 = 0,4 + 0,3 × 8
Júpiter	5,20	5,2 = 0,4 + 0,3 × 16
Saturno	9,55	10 = 0,4 + 0,3 × 32
Urano	19,22	19,6 = 0,4 + 0,3 × 64
Neptuno	30,11	38,8 = 0,4 + 0,3 × 128

La distancia 2,8 no se corresponde con ningún planeta, Neptuno no se encuentra a la distancia correcta y la relación se da por aproximación. Se han realizado esfuerzos considerables para ofrecer una explicación física concreta de esta distribución de las distancias planetarias. Pero la única causalidad que puede encontrarse es que no hay dos planetas capaces de formarse «demasiado cerca» uno del otro.

Dos protoplanetas, «demasiado cerca» el uno del otro, o bien se habrían condensado en uno solo o bien habrían cesado de aumentar a expensas de los mismos materiales (es el caso de la región de los asteroides entre Marte y Júpiter). De hecho, si se sacan números al azar y se excluyen los que están «demasiado cerca» entre sí, se obtiene una distribución que se parece curiosamente a la «ley de Bode-Titius». Ello induce a sospechar que la «ley de Bode-Titius» no es una «ley» causal en el sentido empleado por la física, sino la manifestación de un proceso aleatorio.

La presencia de efectos debidos al azar es palmario en medio de las regularidades del sistema solar. Las señales más claras se observan en la superficie de los pequeños objetos del sistema solar: Mercurio, la Luna, los satélites galileos de Júpiter: Io, Europa, Ganimedes, Calisto. Estos astros poseen una tortuosa superficie, cubierta de cráteres ocasionados por la caída de meteoritos, los últimos que contribuyeron a su formación (7). El carácter accidental, aleatorio, de estas señales es sorprendente. No cabe imaginar más que una nube de pequeños astros golpeándose, agrupándose, haciéndose añicos hasta cobrar la forma de los objetos actuales.

Io, calentado desde el interior por los efectos de marea, muestra una intensa actividad volcánica que oculta la huella de las caídas de los meteoritos. La Tierra presenta pocas señales de caídas de meteoritos: la erosión, los movimientos tectónicos, los sedimentos no han dejado subsistir sino los cráteres más recientes o, a través de las formaciones geológicas, no deja reconocer sino los de mayor tamaño. Por último, los grandes planetas, fundamentalmente gaseosos, no han guardado en su superficie señal alguna de este bombardeo meteorítico, visible con nitidez en la superficie de Marte.

Las mismas capturas de meteoritos cuando se formaron los planetas explican la diversidad en las inclinaciones de sus ejes de rotación sobre el plano de la eclíptica y en sus períodos (figura 5).

Tal vez el caso más sorprendente sea el de Urano: el eje de Urano está tendido sobre el plano de la eclíptica. Esta particularidad puede haber sido originada por la captura de un meteorito más grande, de un planetoide de masa comprendida entre 0,15 y 0,015 de masa terrestre. Bastaría que el planetoide chocase contra el planeta con un ángulo adecuado, lo que, habida cuenta de la dispersión de las órbitas de los planetoides, se imagina sin dificultad.

Objeto	Período de rotación	Oblicuidad
Sol	25-27 días	7°
Mercurio	58,64 días	2°
Venus	−243,00 días	−129°
La Tierra	23 h 56' 04"	23° 27'
Marte	24 h 37' 23"	25° 12'
Júpiter	9 h 55' 30"	3° 05'
Saturno	10 h 39' 24"	26° 44'
Urano	16 h	97° 55'
Neptuno	18 h	29°
Plutón	6 días 9 horas	7°

Los mismos efectos del azar se encuentran entre los asteroides. Los ejes de rotación de los asteroides están distribuidos en todas las direcciones. Sobre un número mucho mayor de objetos (un centenar) que para los planetas, el carácter aleatorio de la oblicuidad de los ejes de rotación aparece con más claridad. En suma, la captura aleatoria de planetasimales parece estar en el origen de esta distribución estadística.

La simetría de revolución en torno al Sol no excluye, en efecto, una dispersión de las velocidades de los planetasimales y de las órbitas situadas en las proximidades del plano de la eclíptica, pero sólo en las proximidades.

Los efectos del azar sobre la distancia entre los planetas y el Sol resultan menos visibles porque están ocultos en un proceso de formación más compleja: hay que captar bien la idea de que el tamaño de los planetas, así como sus distancias con respecto a la estrella central, no resultan de una causalidad tan sencilla como el movimiento del electrón alrededor del protón en el átomo de hidrógeno. Se acumulan muchos efectos y, si la fase última de formación se debe a la captura de grandes planetasimales o planetoides, el reducido número de objetos capturados implica, de manera necesaria, una enorme dispersión alrededor de una mediana que *nosotros no vemos*. Si se pudieran comparar entre sí diversos sistemas planetarios, ciertamente se encontrarían amplias fluctuaciones estadísticas en las masas de los planetas, sus distancias con respecto al astro central, la excentricidad de sus órbitas y la inclinación de sus ejes de rotación.

ATMÓSFERAS PLANETARIAS

El examen de los planetas telúricos muestra una situación muy diferente entre Venus, la Tierra y Marte. Son tan grandes estas diferencias que resulta difícil ofrecer una imagen coherente de la formación de las atmósferas planetarias que deje explicar a la vez las atmósferas de Venus, de la Tierra y de Marte. Sin embargo, una sola explicación nos permite remontarnos hasta la atmósfera terrestre primitiva, de modo que hace concordar los datos geológicos terrestres y el modelo de formación de las atmósferas planetarias.

En la actualidad parece establecido que la atmósfera de los grandes planetas es producto de la captura de gases por parte de un corazón sólido, mientras que la atmósfera primitiva de los planetas telúricos es el resultado de la desgasificación del planeta: los gases son solubles en las rocas fundidas, pero escapan deprisa, como consecuencia del enfriamiento, cuando comienza la solidificación. La atmósfera actual es el resultado de la evolución de la atmósfera primitiva. Explicar las diferencias entre las atmósferas de Venus, la Tierra y Marte se convierte, entonces, en una tarea decisiva.

El medio interestelar de donde surgió la nebulosa primitiva es un medio cuyo componente principal es el hidrógeno molecular. A causa de su rarefacción, el gas está muy lejos del equilibrio y, a pesar de la abundancia de hidrógeno, comporta sólo una cantidad modesta de compuestos saturados: metano (CH_4), amoníaco (NH_3), agua (H_2O), frente al gas carbónico (CO_2), al óxido de carbono (CO) y al nitrógeno molecular (N_2).

Tras la desgasificación, el hidrógeno y el helio escapan rápidamente ya que el campo de gravitación de estos planetas no es suficiente para retenerlos.

Las primeras fases de la evolución de las atmósferas de Venus, la Tierra y Marte habrían sido las siguientes.

Venus

La radiación solar, compuesta en lo principal por radiación visible, se convierte en calor en la espesa atmósfera de este planeta. La radiación infrarroja producida la retiene el gas carbónico, muy absorbente. Este fenómeno, análogo al del cristal de los coches que da paso a la radiación visible pero que preserva de la radiación in-

frarroja, se denomina «efecto de invernadero». La proximidad del Sol aumenta su importancia. En la base de la atmósfera la temperatura es tal que todo el agua se vaporiza. La disociación del agua por causa de los rayos ultravioletas solares libera el hidrógeno, que abandona el planeta en tanto que el oxígeno viene a oxidar la corteza venusiana. Queda una atmósfera compuesta sustancialmente de gas carbónico (96,5 %) y un planeta privado de agua (8).

La Tierra

La presencia de gas carbónico en la atmósfera original produjo un efecto de invernadero que evitó que el agua terrestre se congelara cuando la formación de la Tierra y cuando la desgasificación. No obstante, la temperatura en la base de la atmósfera no bastaba para vaporizar el agua. La disociación del vapor de agua por causa de la radiación ultravioleta solar, actuando en la parte superior de la atmósfera, tuvo un efecto insignificante. La Tierra, pues, conservó su agua. El cambio de composición química de la atmósfera terrestre es probable que sea una consecuencia de la aparición de la vida. Se cree que el inicio de la fotosíntesis en las bacterias azul-verdosas fue el origen del oxígeno terrestre libre. La datación de los restos fósiles de las bacterias y la datación de los minerales de óxidos metálicos indican el sincronismo de dos acontecimientos: el surgimiento de las bacterias azul-verdosas y la oxidación.

La fijación del gas carbónico en los corales se produjo en presencia del agua. Cuando se tiene en cuenta la cantidad de gas carbónico retenido en los depósitos calcáreos se advierte que, con la excepción del agua, la composición del conjunto «océano-atmósfera, gas carbónico fijado» no es distinta, en lo fundamental, de la de Venus.

Si la Tierra primitiva se desplazase en dirección a Venus, hacia algún lugar entre el emplazamiento actual de la Tierra y la órbita de Venus, ello provocaría el efecto de invernadero y la vaporización causaría una aceleración de este efecto, hasta el momento en que el planeta se desecara como Venus.

Se observará que la evolución de la atmósfera terrestre condujo a la concentración actual en oxígeno, un 21 %, resultado de la fotosíntesis. La concentración a partir de la cual es posible la combustión en el aire, es decir un 12 %, no fue superada más que en una fecha relativamente reciente, hace unos 250 millones de años.

Marte

La atmósfera de Marte está constituida por un 95,3 % de gas carbónico; los casquetes polares están compuestos de nieve carbónica. En la base de la atmósfera la presión es muy baja, ya que la masa de la atmósfera es de 100 veces menor que la de la atmósfera terrestre. La atmósfera contiene muy poca agua, un 0,03 % aproximadamente. Sin duda existe hielo en el suelo y cristales de hielo mezclados con la nieve carbónica de los polos. Sin embargo, el agua debió ser antaño mucho más abundante: al lado de restos de bombardeos meteoríticos y de actividad volcánica, se encuentran señales de erosión y antiguos lechos de ríos.

El efecto de invernadero en la atmósfera primitiva más espesa bastó para mantener el agua en estado líquido durante mil o dos mil millones de años. Lentamente, el agua, al disolver el gas carbónico, conllevaba un debilitamiento del efecto de invernadero, hasta el momento en que el agua dejó de ser líquida. La presencia de hielo bajo la superficie de Marte permitiría explicar el modelado del relieve.

Estrategia atmosférica

Dos magnitudes han desempeñado un papel primordial en la formación de las atmósferas planetarias (incluida el agua): por una parte, la distancia al Sol; por otra, la masa del planeta.

Suponiendo que la atmósfera primitiva sea el producto de la desgasificación de las rocas (incluida el agua), la masa de la atmósfera primitiva es proporcional a la masa del planeta. La distancia con respecto al Sol determina la temperatura de la atmósfera, y la masa del planeta determina la velocidad de escape del gas que constituye la atmósfera.

Anteriormente hemos visto lo que habría acontecido con la atmósfera terrestre si la Tierra se hubiese encontrado más cerca del Sol: su desecación. En sentido contrario, si la Tierra primitiva se hubiese encontrado más próxima a la órbita de Marte, se hubiera producido una aceleración glaciar. También hemos visto que la presencia de agua líquida en la superficie marciana durante mil o dos mil millones de años fue debida al efecto de invernadero producido por la presencia del gas carbónico. Hubiera ocurrido lo mismo en un planeta situado más lejos que hubiese tenido la misma masa que

la Tierra. Pero la fijación del gas carbónico disuelto en el agua por medio del lavado prolongado de los silicatos habría acarreado, al igual que en Marte, un decrecimiento en la abundancia de gas carbónico en la atmósfera. La importancia del efecto de invernadero habría menguado poco a poco. Al estar ausente el vapor de agua de las altas capas de la atmósfera, la fotodisociación del agua a causa de la radiación solar habría sido poco relevante, produciendo poco oxígeno. El agua habría podido permanecer en estado líquido hasta nuestros días, al menos en las inmediaciones del ecuador, pero la mayor parte se habría almacenado bajo la forma de gigantescos casquetes polares y de glaciares, siendo difícil evaluar la cantidad de agua líquida que habría estado disponible.

Este análisis cualitativo sugiere, pues, que un planeta Tierra, situado más lejos del Sol, habría sufrido una aceleración glacial y, situado más cerca del Sol, habría sufrido una aceleración térmica. Ahora bien, la existencia del agua líquida es probablemente una condición previa para la aparición de la vida. Determinar cuantitativamente, de manera tan precisa como sea posible, en qué condiciones puede conservar un planeta su agua líquida el tiempo suficiente para que tenga lugar el nacimiento de la vida y su evolución es una cuestión cardinal. Ésta es la que vamos a abordar.

MODELO DE ATMÓSFERA PLANETARIA (9)

El cálculo completo de la evolución de un planeta telúrico en el sistema solar fue realizado por Hart (1978) inspirándose en trabajos de Rasool y de Bergh (1970). Hart ha tenido en cuenta todos los fenómenos físicos importantes:

- la velocidad de la desgasificación desde el interior del planeta,
- la condensación del vapor de agua,
- la fotodisociación y la fuga del hidrógeno,
- la oxidación de los minerales superficiales,
- la formación de los carbonatos bajo el efecto del lavado de los silicatos por parte del agua cargada de gas carbónico,
- la presencia de la vida durante al menos 800 millones de años en un agua de temperatura inferior a 42° centígrados,
- la existencia de un límite a la biomasa, impuesto por la ausencia de la pantalla de oxígeno y de nitrógeno,

- la fotosíntesis y la producción de sedimentos orgánicos,
- las reacciones químicas entre los diferentes gases: N_2, O_2, H_2, H_2O, CO_2, CO, CH_4, NH_3 en presencia del argón,
- la variación de la luminosidad solar,
- la variación del albedo del planeta,
- el efecto de invernadero (fig. 6).

El resultado es el siguiente: la Tierra no puede ser un planeta habitable más que si el radio de su órbita está comprendido entre 0,96 y 1,01 unidad astronómica. Hasta 0,96 unidad astronómica, esto es la aceleración térmica, la vaporización del agua *tiene por efecto* aumentar la temperatura de la superficie, lo que *tiene*

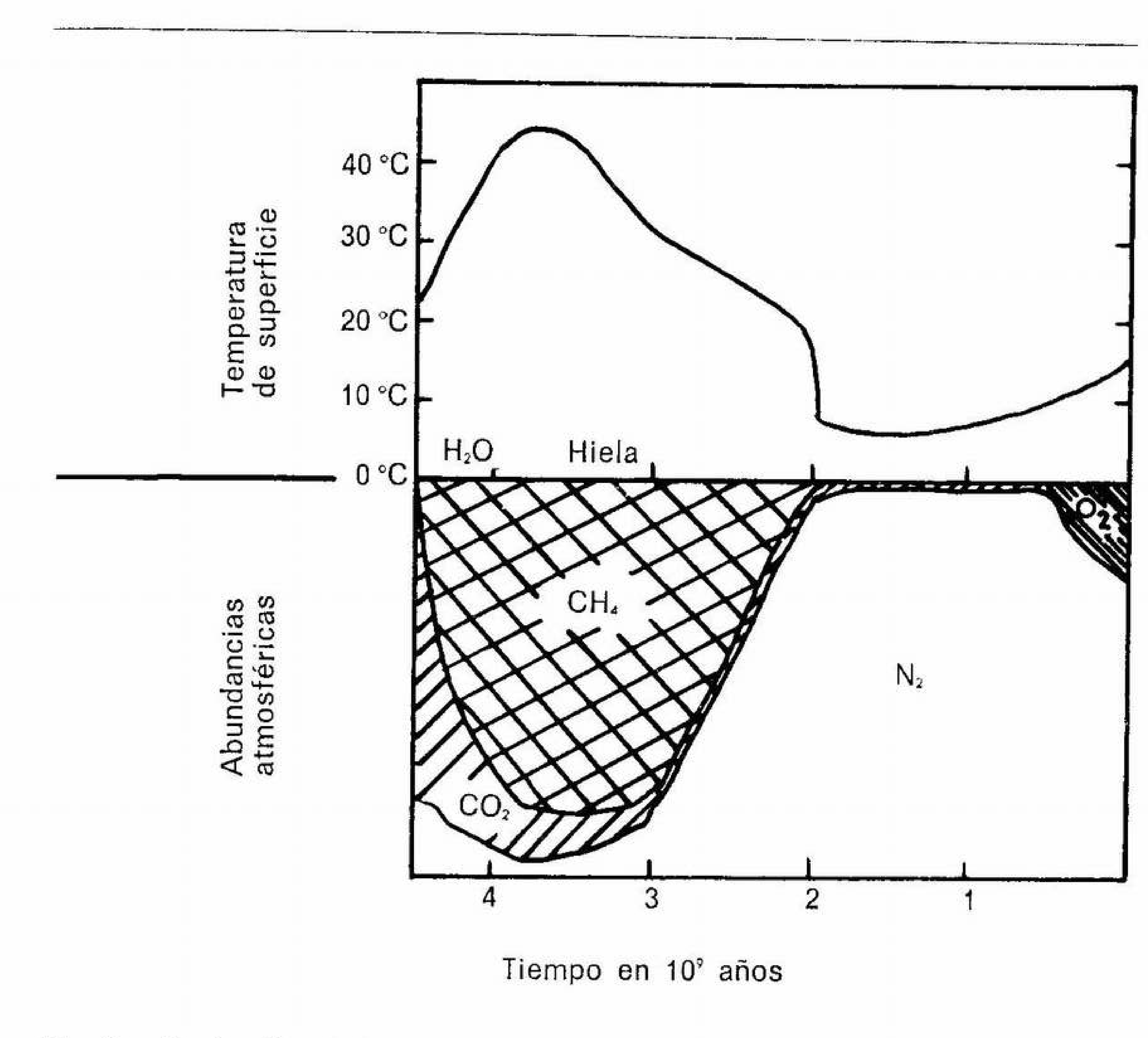


Fig. 6. Evolución de la temperatura y de la composición química de la atmósfera terrestre (modelo de Hart).

por efecto vaporizar aún más agua hasta el momento en que toda el agua ha abandonado el planeta. Más allá de 1,01 unidad astronómica, es la aceleración glacial. La formación de hielo ocasiona una disminución de la cantidad de calor recibida por la Tierra, en razón del poder reflector del hielo. El descenso de la temperatura implica una ampliación de la superficie helada, lo que hará bajar la temperatura.

Si se plantea la pregunta de si un planeta puede constituir una zona habitable durante 4.500 millones de años, habida cuenta de la evolución de la estrella central, se encuentran entonces los resultados siguientes en función de la masa (véase la tabla).

Zona «habitable» en función de la masa de la estrella central

Masa (en masa solar)	*Límite del radio de la órbita*[1] *interior*	*exterior*	*Intervalo*
1,2	1,668	1,692	0,024
1,15	1,456	1,499	0,043
1,10	1,262	1,321	0,059
1,05	1,089	1,155	0,066
1,00	0,958	1,004	0,046
0,95	0,836	0,861	0,025
0,90	0,726	0,0732	0,006
0,871	0,664	0,664	0

1. Unidad astronómica.

Para las masas estelares más elevadas, la evolución hacia el estado de gigante se hace en menos de 4.500 millones de años y puede admitirse que la evolución biológica no podría continuar; para masas más débiles no existe intervalo en el que el planeta pueda permanecer *habitable* de manera permanente durante cuatro mil millones de años. De la misma forma, Hart advierte que por debajo de una masa de 0,9 masa terrestre y por encima de una masa 1,5 masa terrestre, un planeta no puede sino evolucionar, bien hacia la glaciación, bien hacia la aceleración térmica y la pérdida de su agua, sea cual fuere la distancia con respecto a la estrella central, del orden, sin embargo, de una unidad astronómica.

Papagiannis (1981) añade a los efectos de las características estelares, de distancias y de masas planetarias, el efecto de excentricidad de la órbita, y sugiere que una órbita demasiado excéntrica produciría resultados análogos (aceleración térmica o glacial).

Si volvemos a los datos de la página 36, se comprueba que existe aproximadamente una estrella sobre cien en el intervalo «adecuado» de masa, es decir una probabilidad f_B del orden de 0,010. En la hipótesis de una probabilidad uniforme de las distancias de los planetas sólidos sobre dos unidades astronómicas, la probabilidad f_d de que el planeta «adecuado» esté a la distancia «adecuada» es de 0,025. Por último, la probabilidad de que el planeta tenga la masa «adecuada» es aún más incierta, ya que esto indudablemente hace intervenir la masa de la nebulosa primitiva. Una evaluación optimista es $f_M = 1/2$. En síntesis: habida cuenta del intervalo de masa de la estrella central, del intervalo de distancia del planeta a la estrella central, del intervalo de masa del planeta, de la probabilidad de la excentricidad «adecuada» (que no hemos considerado pág. 62), la frecuencia de las estrellas que posean un «adecuado» sistema planetario es todo lo más del orden de 0,0001...

Claro que el modelo de Hart es criticable: no todos los mecanismos, ni todos los procesos, ni todos los bucles de retroacción están contemplados en el modelo. Sin embargo, el orden de magnitud del resultado es verosímil. Se observará una hipótesis biológica igualmente verosímil, pero no demostrada: la necesidad, para que aparezca una vida evolucionada, de un intervalo de tiempo de 4.000 a 5.000 millones de años. Esto también excluye la proximidad de una estrella doble. Un planeta con órbita complicada presentaría variaciones considerables de la distancia con respecto al sistema central y, como lo sugiere Papagiannis para una órbita excéntrica en el sistema solar, conduciría a una u otra de las catástrofes, la térmica o la glacial.

DE LA LEY GENERAL AL ACCIDENTE ESTADÍSTICO

Si se juega a cara o cruz, pueden hacerse series de diez partidas, cien o más. Con una moneda perfectamente simétrica y lanzándola sin favorecer ninguna de las dos caras, existe una probabilidad igual de que salga *cara* o *cruz*. Cuando se trata de series cortas, es posible que las fluctuaciones sean amplias, y que cara o cruz no salgan en un número parejo.

Cuando el número de tiradas se hace muy grande, a medida que se juega se observa que la diferencia absoluta:

$$N_{cruz} - N_{cara}$$

aumenta mientras que la diferencia relativa,

$$\frac{N_{cruz} - N_{cara}}{N_{cruz} + N_{cara}}$$

continúa *disminuyendo*.

Cuando el número de tiradas aumenta sin límite, la diferencia relativa tiende a cero. Esta transición de un pequeño número de tiradas, en que el carácter discontinuo es dominante, a un número muy alto de tiradas, en que la discontinuidad se reducirá hasta hacerse escasamente visible, realiza en un ejemplo sencillo el paso del accidente estadístico (diferencia relativamente grande) a la ley de los grandes números (diferencia relativamente pequeña).

Esta diferencia es evidente si se considera un pequeño volumen de gas en el que se agitan algunas moléculas, o bien un gran volumen en el que se encuentra un número elevadísimo de moléculas. En el primer caso domina el carácter aleatorio, accidental, del movimiento de las moléculas, mientras que en el segundo el movimiento de conjunto del fluido es el hecho esencial.

En el paso de lo discreto o lo discontinuo al casi continuo de los grandes números se halla una especie de zona borrosa en la que todavía es visible el carácter aleatorio de los pequeños conjuntos de objetos, y no el aspecto uniforme que dan las grandes cifras. Resulta que la formación del sistema solar reúne los dos aspectos del fenómeno estadístico.

La formación de una estrella y de su nebulosa primitiva hace intervenir a un enorme número de átomos, tan enorme que cualquier noción de discontinuidad se borra ante las propiedades del fluido a gran escala.

La reunión de los elementos o de los compuestos refractarios en granos de algunos milímetros o centímetros de diámetro conduce a la producción de un número tan alto de pepitas que hace la descripción estadística todavía posible. Pero, a medida que el tamaño de los planetasimales o planetoides va en aumento, el papel de las fluctuaciones accidentales cobra cada vez mayor importancia. Con base en estos puntos, podemos efectuar algunas observaciones:

— La formación de una estrella y de su nebulosa primitiva, al involucrar vastas masas fluidas, precisa del método de estudio de los medios continuos. Los datos iniciales del sistema, fuera de su composición química, son su masa, sus propiedades de rotación, su campo magnético. Es verosímil que estas magnitudes posean una dispersión estadística, dispersión de los períodos de rotación, dispersión de las masas de las nebulosas primitivas. No conocemos estas leyes estadísticas y nuestra evaluación (pág. 64) de la frecuencia de los sistemas planetarios adecuados es, todo lo más, verosímil.

— Igualmente debemos tener en cuenta las fluctuaciones de la composición química, asociadas al transporte de los elementos y a su mezcla en la Galaxia tras las últimas explosiones de supernovas.

El pequeño número de supernovas que haya explotado en la proximidad de una protoestrella tiene como consecuencia una desmedida importancia de las fluctuaciones. Volvemos a encontrarnos aquí con los efecto aleatorios de un corto número de tiradas al azar.

Estas fluctuaciones de la composición química pueden implicar variaciones en la cantidad de compuestos condensables, o sea, en el tamaño de los granos.

— La producción de un número finito de planetasimales de gran tamaño puede conllevar fluctuaciones significativas en la masa de los planetas, el radio de su órbita, su período de rotación y la oblicuidad de su eje de rotación.

¿PLANETAS AZULES?

De una estrella a la otra, los efectos acumulados de las diversas condiciones iniciales y de los efectos estadísticos pueden conducir a sistemas planetarios que presenten desemejanzas apreciables en relación con el nuestro, con planetas de masas distintas y ubicados a distancias diferentes de la estrella central.

En medio de estas variaciones, ¿cuál es la amplitud del campo de formación de un planeta con agua líquida, que posea un clima templado y la «adecuada» composición química *con vistas a* la aparición de la vida?

«Con vistas a» es un recurso estilístico voluntario. No existe una finalidad en estas reflexiones que contemplan *a posteriori*, en medio de las variaciones posibles, los lugares favorables a la explosión vital. Ya hemos visto que esto no podría realizarse más que una vez de diez mil. La universalidad de las leyes de la naturaleza nos sugiere que la aventura biológica es *posible* en la Galaxia. Pero también nos dice que la frecuencia de los *planetas azules* en la Galaxia no es más que de una sobre diez mil.

III. DEL MEDIO ABIÓTICO A LA CIVILIZACIÓN

ADVERTENCIA

El autor no es biólogo ni historiador. Las reflexiones que aquí figuran proceden, en primer lugar, de la información extraída «de los mejores autores». A continuación vienen las consideraciones enunciadas con prudencia sobre el origen de la vida, la evolución, las civilizaciones y el desarrollo de las civilizaciones. Al final de esta sección se hallará una estimación del número de planetas que se forman cada año en la Galaxia susceptibles de ser portadores de una civilización.

Siempre que es posible, el autor vuelve al campo de la física, que para él es la fuente de información, de reflexión, el método más sólido para sostener un razonamiento válido en este terreno.

¿ESTAMOS SOLOS?

Ante la complejidad de las moléculas que componen el ser vivo hay dos escuelas enfrentadas: de acuerdo con una, la constitución de las moléculas vitales es un accidente, un acontecimiento tan poco probable que se ha producido muy raramente, acaso una sola vez en toda la extensión del Universo visible; de acuerdo con la otra, la producción de estas moléculas no es fruto del azar: la realización de un orden y de una estructura resulta de las leyes de la termodinámica y la aparición de la vida pertenece a lo necesario y no a lo accidental.

Los defensores de la primera escuela, que puede denominarse

escuela *solipsista**, utilizan argumentos de índoles diversas: estadísticos, biológicos, o desarrollan modelos de la actividad vital y de la inteligencia extraterrestre que permiten por un *razonamiento llevado al absurdo* mostrar que estamos solos en el Universo.

Los defensores de la segunda escuela (denominada *optimista* en la literatura mundial sobre el tema) presentan argumentos científicos opuestos y muestran que los datos actuales, los hechos, son compatibles con la presencia de civilizaciones extraterrestres (¿numerosas?) en la Galaxia.

En un campo en el que, por el momento, falta en absoluto la prueba científica, ya que no conocemos más que un solo planeta en el que la vida haya aparecido y se haya desarrollado, el nuestro, y puesto que no conocemos todas las etapas que han desembocado en la aparición de la vida, todas las discusiones sobre la vida, *a fortiori* sobre la inteligencia en el Universo, poseen un carácter especulativo.

Cada autor trata de construir un sistema científico coherente, queriendo dar a esta especulación las garantías de una verdad científica. Pero, en un campo en el que no existe la corrección de lo especulativo por medio de la observación y la experiencia, y en el que la sola base consiste en la observación de un hecho rico y complejo en extremo, pero único (la vida sobre la Tierra), es imposible tener la seguridad de que se ha alcanzado la verdad científica.

Se siente entonces la tentación de pensar que tanto la actitud solipsista (el hombre es el centro del Universo y está solo en él), como la actitud optimista, hostil al antropocentrismo (el hombre es uno de los avatares de las innumerables apariciones de la civilización en el Universo), son indicaciones de creencias extracientíficas no confesadas.

Para Giordano Bruno, Dios, en toda su omnipotencia, no podía limitarse a la creación exclusiva del hombre sobre la Tierra (1). Pero esta atrevida hipótesis chocaba con la unicidad divina de Cristo y este rechazo del dogma fue lo que condujo a Giordano Bruno a la hoguera. La creación única del hombre sobre la Tierra descansa todavía sobre la creencia de ciertos cristianos tradicionalistas: se conoce la existencia en los Estados Unidos de una fuerte corriente que postula la enseñanza escolar del creacionismo siguiendo el texto bíblico, en paralelo con el evolucionismo presentado como una simple hipótesis.

* Solipsista: del latín *solus*, solos en el Universo.

Sería interesante destacar las fuentes ideológicas inspiradoras de las diferentes escuelas de pensamiento que se han interesado por la búsqueda de inteligencia extraterrestre. Pero las creencias no se limitan a las religiosas de los tradicionalistas. Un cierto deísmo, como un ateísmo riguroso, pueden impregnar las preocupaciones de los teóricos.

No se puede determinar con transparencia el papel de las convicciones, ya religiosas ya racionalistas, en la elaboración de una teoría, sea ésta la de la pluralidad de mundos habitados, sea la hipótesis solipsista. De hecho, según hemos visto ya en el esbozo histórico de la introducción, las convicciones de los científicos han evolucionado entre estos dos polos. La necesidad de que las creencias sean apoyadas por la ciencia es un hecho moderno. En un campo en el que la ciencia no se encuentra todavía en situación de responder a todas las preguntas, es fácil utilizar por extrapolación aquello que se sabe con el sentido que se pretende. En este debate el autor no persigue una objetividad plena. Su enfoque está basado en la convicción de la universalidad de las leyes de la naturaleza.

ORDEN Y DESORDEN

La vida es orden, organización, información, replicación. La noción de orden domina en medio de un universo de desorden. No puede abordarse el problema de la noción de orden sin pasar a esclarecer, aunque no sea más que un instante, el sentido de las palabras.

Cierto número de términos: orden, desorden, jerarquía, son portadores de un sentido social. Se refieren al funcionamiento del Estado, a su buena o mala administración, al control de la calle y de las masas por la policía, a las relaciones entre las personas y a sus funciones en el sistema de gestión.

No es éste, ciertamente, el sentido que prevalece cuando se trata del mundo físico. Y, sin embargo, parece verosímil que la concepción de un mundo ordenado no haya podido tener lugar más que en una sociedad en la que el orden de la jerarquía y el control de las funciones del Estado se imponían como valor universal, desde el mundo de la sociedad al mundo de la materia. ¿Ha pesado en verdad el carácter peyorativo del término «desorden» en la cien-

cia del desorden, la física estadística? Boltzmann, creador de la teoría cinética de los gases y de la mecánica estadística, se suicidó al ser incapaz de superar la hostilidad de los alumnos y sucesores de Ernst Mach —y del propio Mach—, quienes no creían más que en los medios continuos e impugnaban la teoría atómica.

Hace ya mucho tiempo que los físicos abrieron paso a los fenómenos aleatorios, al ruido, a los movimientos caóticos, a la turbulencia, en un principio considerados como hechos irrefutables pero difíciles de captar conceptualmente, de ofrecer un modelo, de teorizar. Hoy día las cosas cambian todavía con más rapidez gracias a los nuevos desarrollos experimentales y a los esfuerzos de los matemáticos.

¿Cómo se efectúa el paso del orden al desorden? ¿Cómo puede nacer el orden del desorden? Éstas son las cuestiones que se estudian en la actualidad. Es imposible abordar el problema de la vida sin situarse en el seno de una teoría general, sin utilizar un punto de vista global, de forma tal que el fenómeno de la aparición de la vida pueda considerarse como un caso particular (y de extraordinaria trascendencia) de una propiedad universal, la aparición de un orden específico, el de la vida.

Las nociones de orden y desorden son en sí mismas nociones por completo relativas y es arduo (o imposible, tal vez) definirlas con un carácter absoluto. Esto es lo que vamos a ver en las páginas que siguen.

EQUILIBRIO

La misma noción de equilibrio posee diversos significados, según el sistema al que se aplique. Ofrezcamos diversos ejemplos.

Imaginemos un cuenco y una bola. Se hace rodar la bola por la pared del cuenco. La bola desciende, sube por el otro costado, vuelve a bajar. Gira con oscilaciones en el fondo del cuenco, el punto más bajo. Si el frotamiento no existiese seguiría oscilando indefinidamente.

El frotamiento disipa en calor la energía del movimiento de la bola. La amplitud de la oscilación de la bola disminuye y, al cabo, se queda en reposo en el punto más bajo. En tal posición se encuentra en equilibrio estable. Desplazada un poco, la gravitación la empuja hacia abajo, hacia su punto de equilibrio.

Coloquemos ahora la bola sobre un balón. En el punto más elevado, la bola estaría en equilibrio, si llegase en efecto, a estar colocada en tal punto con precisión absoluta. Pero se sabe que una desviación infinitesimal basta para que la bola se aleje cada vez más del polo de la esfera. La gravitación la aleja siempre: el polo es un punto de equilibrio inestable para la bola.

Se trata aquí de la primera noción de equilibrio, la más elemental. De manera general se dirá que un sistema es estable si, apartado de su posición de equilibrio, vuelve a él, y se dirá que es inestable si, apartado de su posición de equilibrio, se aparta cada vez más.

De esta concepción se deriva la noción de equilibrio termodinámico. Si se imagina un gas encerrado en un recinto a temperatura uniforme y constante, al cabo de un tiempo infinito, tal gas alcanzará el estado de equilibrio termodinámico. De hecho, hace falta poco tiempo para que el gas se encuentre en un estado muy próximo al equilibrio termodinámico.

¿Qué es lo que ocurre?

Las moléculas de gas chocan constantemente entre sí y, al hacerlo, intercambian energía. Intercambian energía con la pared. Reciben tanta como dan. En el estado de equilibrio termodinámico, la velocidad de las moléculas ha alcanzado un régimen estacionario: el número de moléculas que posee una velocidad dada o, con más precisión, comprendida en un intervalo pequeño es constante.

Esta ley es una ley estadística. No tiene sentido más que referida a un conjunto muy numeroso de moléculas. Esta condición queda satisfecha con facilidad porque existen 30.000 millones de moléculas de aire en un centímetro cúbico y existen aún miles de millones de moléculas en un intervalo de velocidad igual a la milmillonésima parte de la velocidad media. El aspecto aleatorio y estacional se manifiesta en este nivel de la manera siguiente: el número de moléculas en este minúsculo intervalo sufre fluctuaciones del 0,001 %, pero estas mismas fluctuaciones son estacionarias, es decir, que guardan las mismas propiedades con el transcurso del tiempo.

El equilibrio termodinámico, en las condiciones que hemos descrito (un gas en un recinto cerrado a temperatura uniforme y constante) es un equilibrio estable. Después de cualquier tipo de perturbación, el gas vuelve a su estado primitivo. El tiempo necesario para el retorno al estado primitivo apenas es mayor que el intervalo de tiempo que transcurre entre dos colisiones de dos moléculas. En el aire, con las condiciones habituales que nos rodean, este inter-

valo de tiempo es del orden de una milmillonésima de segundo.

Sin embargo, el estado que hemos descrito es completamente artificial. Ni siquiera es el estado obtenido en una experiencia de laboratorio. Es el estado de un gas en una experiencia pensada, se trata de un «*gedanken experiment*».

En la naturaleza las cosas son diferentes, más ricas y más variadas; por lo común, el estado natural se encuentra *falto de equilibrio*.

CARENCIA DE EQUILIBRIO

Un sistema puede carecer de equilibrio y, no obstante, estar en un régimen estable. El estado del sistema puede describirse en diferentes niveles, macroscópico, microscópico, lo que permite comprender sus propiedades a la perfección.

Se sabe que en un gas las moléculas se agitan en todos los sentidos y que la velocidad de agitación de las moléculas aumenta con la temperatura. Se debe a Boltzmann la relación entre la energía cinética media de una molécula «puntual» y la temperatura,

$$E = \frac{3}{2} kT$$

donde k es la constante de Boltzmann ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ julios) y T la temperatura absoluta (grados Celsio más 273,15°). Cercanas al equilibrio, tales propiedades son válidas localmente.

Consideremos un gas entre dos paredes que posean dos temperaturas diferentes. El calor es transportado desde la pared cálida a la pared fría. Cabe describir este transporte de calor de la manera siguiente: una molécula de gas choca contra la pared caliente, gana energía, es reenviada por la pared y, mediante colisiones, cede esta energía a otras moléculas hasta el momento en que, progresivamente, algunas moléculas ceden energía a la pared fría. Si la diferencia de temperatura entre las dos paredes no es desmesurada (hay que precisarla), el sistema alcanza un régimen estacionario estable, en el que sólo se manifiestan los movimientos individuales aleatorios de las moléculas. El *sistema es estable, sin embargo carece de equilibrio*.

Se reproduce la misma situación con un líquido colocado entre

dos paredes horizontales, la inferior de las cuales esté a una temperatura más elevada que la superior. En tanto que la diferencia de temperatura no sea desmesurada, no ocurre movimiento alguno de conjunto en el fluido. *El fluido es estable, sin embargo carece de equilibrio*.

En los dos casos el calor es transportado de una pared a otra por medio de los movimientos microscópicos y aleatorios de miles de millones de moléculas. Se dice que el calor es transportado por *conducción*.

El sistema está falto de equilibrio porque el balance final de energía en las colisiones entre moléculas posee un sentido único. Las moléculas «calientes» pierden energía, que comunican a las moléculas «frías» y la fuente de energía que es la pared caliente proporciona sin cesar energía, energía necesaria al establecimiento del régimen estacionario carente de equilibrio.

Desde el instante en que un flujo de calor existe en un gas, un líquido, un sólido, el medio deja de estar en equilibrio termodinámico. En el medio existe una dirección privilegiada: la dirección del flujo de calor. El medio está estructurado por el flujo de calor.

REACCIONES QUÍMICAS CARENTES DE EQUILIBRIO

La función de la diferencia en el equilibrio termodinámico es todavía más asombrosa cuando son posibles las reacciones químicas. Ya nos hemos encontrado con estas propiedades en relación con el problema del origen de los elementos químicos, pero para nuestro propósito es interesante ver con exactitud cuál es la función de la diferencia en el equilibrio termodinámico. A continuación examinaremos otros ejemplos del papel de la diferencia en el equilibrio, en especial en la formación de las moléculas propias de los seres vivos, esto es, los aminoácidos.

Formación del helio

A una temperatura muy elevada, diez mil millones de grados, hay equilibrio entre el hidrógeno y el helio:

$$4\,{}^{1}H \rightleftarrows {}^{4}He + 2 \text{ electrones} + 2 \text{ neutrinos}$$

La relación entre el número de núcleos de helio y el número de núcleos de hidrógeno está en función de la temperatura y de la densidad.

De izquierda a derecha (fusión del hidrógeno en helio), hay liberación de energía; de derecha a izquierda (romper el helio para dar lugar al hidrógeno), es preciso suministrar energía. Para esta reacción, como para todas las reacciones químicas, una subida de temperatura favorece la disociación, aquí la disociación del helio; un descenso de la temperatura favorece la formación del helio.

La velocidad de reacción depende de la temperatura. La velocidad de formación del helio varía lentamente con la temperatura, pero la velocidad de destrucción del helio decrece rápidamente con la temperatura, muy deprisa. A diez mil millones de grados, para una densidad de un gramo por centímetro cúbico, el equilibrio se alcanza en algunos segundos.

La expansión del Universo orienta el tiempo e impide que se produzca el equilibrio. En la expansión, el medio primitivo se enfría, de forma tal que la reacción de destrucción del helio reduce pronto su velocidad. De hecho la velocidad de destrucción del helio decrece con tanta rapidez con la temperatura que en unos pocos segundos se paraliza la abundancia de helio. Se puede mostrar que la producción de orden nuclear (el núcleo de helio es un sistema ordenado) se realiza a expensas de un mayor desorden microscópico.

Formación de elementos

Los núcleos de los elementos químicos son sistemas tanto más ordenados cuanto mayores son. Un examen, incluso rápido, de la formación de los elementos nos confirma en esta idea de la producción de orden en la naturaleza *en todos los niveles*. En el interior de las estrellas, donde la temperatura es mucho más baja que en el Universo originario (salvo en el corazón de las supernovas), la diferencia en el equilibrio químico es tal que las reacciones de formación de los elementos se ven favorecidas. El alza de la temperatura permite la producción de elementos. La tasa de reacción puede ser mucho más corta que la edad del Universo, pero la velocidad de reacción inversa es tan lenta que los elementos fuertemente unidos, cuya producción va acompañada de un gran desprendimiento de energía, se acumulan: de ahí el enriquecimiento de la Galaxia con carbono, oxígeno y metales desde su origen, hace diez o quince mil

millones de años. Es demostrable, como se ha dicho con anterioridad, que la diferencia en el equilibrio termodinámico, productor del desorden microscópico, es al mismo tiempo generadora de estructuras a escala del núcleo de un átomo.

Elementos radiactivos

La diferencia en el equilibrio hace posible la formación de los elementos radiactivos en condiciones extremas (la explosión de las supernovas), en las que, durante algunas milésimas de segundo, los núcleos de hierro capturan, cada uno, unos 200 neutrones.

Merece ser mencionado este ejemplo porque los elementos radiactivos son la fuente de calor localizada en el interior del globo y resulta válido recordar lo que anteriormente hemos afirmado. La temperatura de las capas profundas, más elevada que la temperatura de la superficie, convierte en fluidos los minerales que forman el magma sobre el que flotan las placas; la importancia del vulcanismo depende del flujo de calor que procede del interior de la Tierra y de la temperatura que allí reina, estando gobernados ambos factores por la cantidad de elementos radiactivos. No es evidente que una Tierra que contuviese, por ejemplo, dos veces más de elementos radiactivos fuese un lugar favorable para la aparición de la vida (pero, ¿y si tal vez fuese más favorable?).

Describamos, pues, este mecanismo. Hay estrellas que evolucionan durante algunos centenares de millares de años hasta que se constituye una región central muy densa, hecha de átomos del grupo del hierro, rodeada de una inmensa cobertura de carbono, oxígeno y helio. Esta región central se contrae lentamente, mientras la temperatura y la densidad central aumentan con regularidad. Cuando la temperatura central se forma lo bastante elevada, los núcleos del grupo del hierro se disocian absorbiendo una enorme cantidad de energía. Esta energía no puede ser suministrada más que por la gravitación, lo que quiere decir que las regiones centrales se desploman sobre sí mismas hasta el momento en el que los neutrones, agolpados unos contra otros, constituyen un corazón duro sobre el que rebotan las capas exteriores. Una formidable onda de choque barre entonces la materia de la estrella desde el interior hacia el exterior hasta expulsarla en la Galaxia casi por completo. No subsiste sino el corazón de neutrones, que forma una estrella ultradensa como conocemos centenares en la actualidad: los pulsares.

Los neutrones producidos por la disociación del hierro no permanecen inactivos. Carecen de equilibrio, ya que se desmiembran para dar lugar a un protón, un electrón negativo y un antineutrino cuya duración de vida es de 12 minutos. Pero no hace falta tanto tiempo para que reaccionen. En algunas milésimas de segundo, hay neutrones que son capturados por los núcleos de hierro de la periferia del corazón, allí donde no se ha producido la disociación mencionada. Sobre los núcleos de hierro se produce una acumulación de neutrones hasta engendrar núcleos muy pesados cuya duración de vida en sí no excede de algunas milésimas de segundo. Su rápida degradación radiactiva conduce a elementos menos inestables, los elementos radiactivos denominados «naturales».

Síntesis orgánica

Las largas cadenas carbonadas pueden romperse en moléculas más pequeñas, cuya velocidad de reacción crece muy rápidamente con la temperatura. A 700° C esta rotura de las largas cadenas carbonadas se practica con fines industriales: es el *cracking*. Por debajo de los 400° C, las velocidades de reacción son tan débiles que puede considerarse que las cadenas son estables.

Un método de síntesis muy clásico, el método de Wurtz, consiste en calentar en un tubo cerrado un yoduro del radical R en presencia de sodio. La reacción exotérmica que se produce a continuación es la siguiente:

$$2\,RI + Na \rightarrow 2\,INa + R\text{-}R$$

La temperatura es demasiado baja para que la rotura de la cadena R-R se produzca de manera apreciable; sin embargo, es lo bastante elevada para que se desarrolle la reacción en la que el yodo es separado del radical R por el sodio y donde dos radicales R se funden.

El enfriamiento del sistema interviene antes que se haya podido alcanzar equilibrio alguno. En este caso típico, es la manipulación de la temperatura, que el experimentador convierte en magnitud dependiente del tiempo, la que rompe los fenómenos de equilibrio y permite la síntesis orgánica.

FÍSICA DE LAS REACCIONES

En toda reacción química, se trate de química nuclear, de química mineral o de química orgánica, el proceso elemental en general consiste en la colisión de dos «objetos»: núcleos, átomos, moléculas, que reaccionan para dar eventualmente productos diferentes. En el caso de la síntesis de Wurtz (descrita con anterioridad), de hecho habría que escribir:

$$RI + Na \rightarrow INa + R$$
$$RI + Na \rightarrow INa + R$$
$$R + R \rightarrow R - R$$

Desde el punto de vista microscópico, los fenómenos preponderantes son reacciones por colisiones de dos cuerpos, R I y Na, de una parte, R y R, de otra.

Para que la reacción R I + Na se produzca con una velocidad no desdeñable, es preciso elevar la temperatura. Este hecho vuelve a repetirse en innumerables casos. El más corriente es aquel con el que nos encontramos sin cesar en la vida cotidiana: en el aire, con su 21 % de oxígeno, la madera, el papel y los tejidos no arden espontáneamente, mientras que la formación del gas carbónico, muy exotérmico, requiere un estado de equilibrio en el que todo el carbono disponible se combinaría bajo la forma de gas carbónico.

Es conocida la célebre novela de Ray Bradbury, *Fahrenheit 451*, en la que una dictadura busca y destruye todo lo que está impreso, en especial los libros. La temperatura que da título a la novela (235° Celsius = 451° Fahrenheit) cifra los grados en que comienza la ignición del papel. Es la temperatura mínima para que ardan los libros.

La combustión del papel se inicia cuando las colisiones entre moléculas de oxígeno y fibras de papel tienen la energía suficiente. En ese momento los átomos de oxígeno están bastante próximos a los átomos de carbono y a los de hidrógeno para que el enlace C-H se rompa y sea reemplazado por un enlace C-O mucho más sólido: es el comienzo de la combustión.

Todo ocurre como si fuera necesario que los oxígenos atravesaran una barrera que les permita aproximarse lo bastante a los carbonos y a los hidrógenos y enlazarse allí. La superación de esta barrera se realiza tanto mejor cuanto más elevada sea la velocidad de los oxígenos o, en otros términos, cuanto más elevada sea la tempe-

ratura del gas. En el caso de la combustión, se produce un fenómeno de *aceleración*, porque el calor desprendido aumenta localmente la temperatura, acelerando por consiguiente la velocidad de las moléculas de oxígeno, y, a su vez, la velocidad de reacción.

Esta necesidad de atravesar una barrera se presenta en todos los tipos de reacciones: nucleares, químicas. Es lo que explica el comportamiento de la velocidad de reacción con la temperatura. Da cuenta de por qué un sistema en apariencia inerte puede contener potencialidades que no se manifiestan sin la intervención de un agente exterior. Todo nuestro discurso sobre la formación de moléculas complejas va a descansar, de hecho, en el comportamiento de las velocidades de reacción bajo el efecto de los cambios de condiciones físicas y en la función que desempeña la diferencia de equilibrio.

MOLÉCULAS BIOLÓGICAS

Los seres vivos están constituidos por la reunión de un pequeño número de moléculas simples, aminoácidos, bases nucleicas, azúcares y ácidos grasos. Estos elementos constitutivos de las macromoléculas celulares suelen estar con frecuencia asociados en largos encadenamientos lineales, tales como las proteínas, los ácidos nucleicos o los polisacáridos.

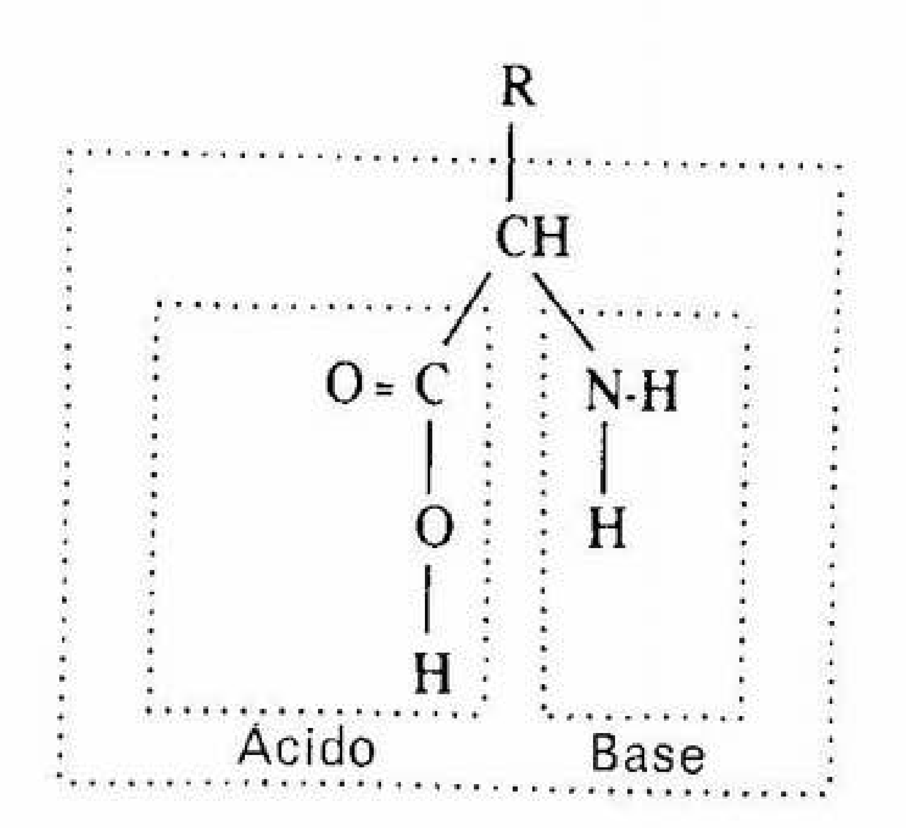
Las proteínas son las «herramientas» de la química de la vida (las enzimas) o bien sirven para la edificación de la arquitectura celular. Constituyen encadenamientos de *aminoácidos* (2).

Un aminoácido es una molécula orgánica constituida por dos partes: una es común a todos los aminoácidos y comporta dos funciones, una función ácida (terminación COOH) y una función amina (base orgánica $-N-H_2$). Estas dos funciones están implicadas en el proceso de polimerización al que nos referiremos más adelante.

Entre el COOH y el NH_2 se encuentra un carbono sobre el que se fija un radical R (ver página siguiente arriba).

Existen tantas especies de ácidos amínicos como de radicales R, es decir un número ilimitado de especies (o prácticamente ilimitado). De todos los ácidos amínicos posibles, sólo 20 se dan en las proteínas, los cuales están presentes en todas las formas de vida*.

* Las proteínas contienen igualmente ácidos amínicos que han sido acetilados, metilados o fosforilados tras la síntesis de la cadena polipeptídica.



Estos 20 ácidos amínicos poseen una importancia tal que resulta útil observar cuál es su constitución; éste es el objetivo de la tabla de la página siguiente (fig. 7).

Las proteínas están constituidas por una cadena de ácidos amínicos; una función ácida se une a una función base para formar los eslabones de la cadena polipeptídica:

```
      R1                 R3                  R5
      |       O    H     |      O     H      |
      C       ||   N     C      ||    N      C
 \  / H \  / C  \H/ \  / H \  / C  \H/ \  / H \
  C      N       C     C     N       C     C     N
  ||     H       |     ||    H       |     ||    H
  O              |     O             |     O
                 R2                  R4
```

Una proteína «pequeña» comporta un centenar de ácidos amínicos. El número de cadenas polipeptídicas de este tamaño que en teoría es posible formar es fantástico: 20^{100} ó 10^{130} (un 1 seguido de 130 ceros); este número es mucho mayor que el número de átomos situados en el interior del horizonte cosmológico (es decir, todas las galaxias hasta diez mil millones de años-luz). En los organismos vivientes se encuentra una pequeña fracción de las proteínas teóricamente posibles; utilizan menos de 100.000 proteínas diferentes.

Otras macromoléculas biológicas, los ácidos nucleicos, desempeñan un papel esencial en la transmisión de los caracteres hereditarios, en la conservación del mensaje genético y en su utilización. Son de dos tipos, los ácidos desoxirribonucleicos, ADN, y los ácidos ribonucleicos, ARN.

Aminoácidos alifáticos	
simples	
Glicocola	$\mathrm{H{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Alanina	$\mathrm{CH_3{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Valina	$\mathrm{(CH_3)_2CH{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Leucina	$\mathrm{(CH_3)_2CH{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Isoleucina	$\mathrm{(CH_3)(CH_3{-}CH_2)CH{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Alcoholes	
Serina	$\mathrm{CH_2OH{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Treonina	$\mathrm{CH_3{-}CHOH{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Sulfurosos	
Cisteína	$\mathrm{HS{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Metionina	$\mathrm{H_3C{-}S{-}CH_2{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Diácidos y sus amidas	
Ácido aspártico	$\mathrm{HOOC{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Asparagina	$\mathrm{H_2N{-}C({=}O){-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Ácido glutámico	$\mathrm{HOOC{-}CH_2{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Glutamina	$\mathrm{H_2N{-}C({=}O){-}CH_2{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Diaminados	
Lisina	$\mathrm{H_2N{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Arginina	$\mathrm{H_2N{-}C({=}NH){-}NH{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Aminoácidos aromáticos	
Fenilalanina	(anillo) $\mathrm{{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Tirosina	HO–(anillo) $\mathrm{{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Triptófano	(anillo, N H) $\mathrm{{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Aminoácidos heterocíclicos	
Histidina	(anillo N, NH) $\mathrm{{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}COOH}$
Prolina	(anillo N H) –COOH

Fig. 7. Todos los seres vivientes de la Tierra tienen como constituyentes básicos los 20 ácidos amínicos cuya estructura se reproduce aquí (Documento proporcionado por gentileza de *Encyclopaedia universalis*).

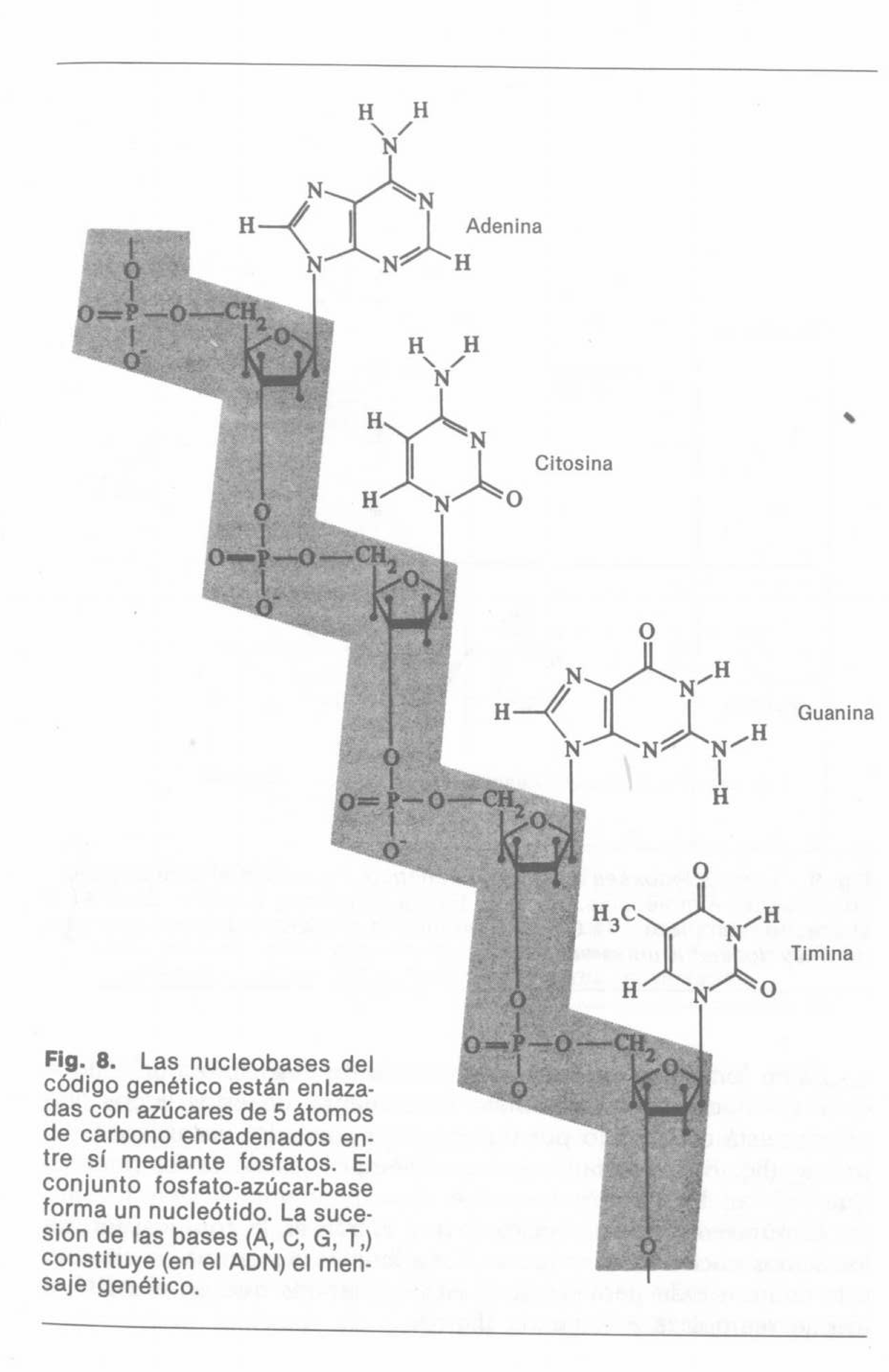


Fig. 8. Las nucleobases del código genético están enlazadas con azúcares de 5 átomos de carbono encadenados entre sí mediante fosfatos. El conjunto fosfato-azúcar-base forma un nucleótido. La sucesión de las bases (A, C, G, T,) constituye (en el ADN) el mensaje genético.

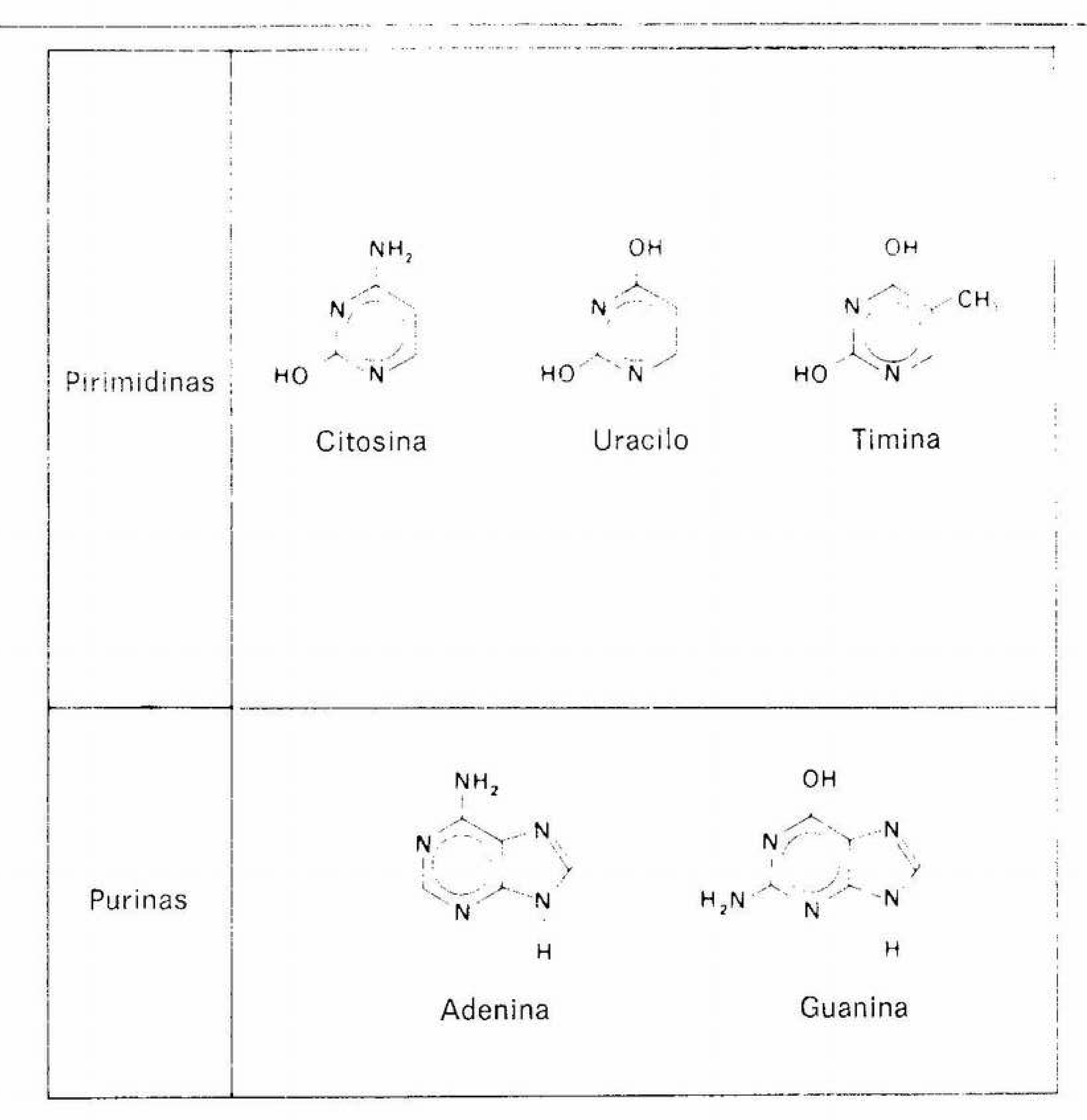


Fig. 9. *Las nucleobases del código genético.* En el ADN el código genético utiliza las 4 moléculas: citosina, timina, adenina y guanina. En el ARN el uracilo reemplaza a la timina (Documento proporcionado por gentileza de *Encyclopaedia universalis*).

Están formados de encadenamientos de desoxirribonucleótidos o de ribonucleótidos. El motivo fundamental de estos largos filamentos está constituido por una base nitrogenada, un azúcar y un fosfato (fig. 8). El fosfato es el que permite establecer los puentes que enlazan los nucleótidos entre sí.

El número de bases nucleicas que entran en la composición de los ácidos nucleicos es reducido. La adenina, la guanina, la citosina y la timina sirven para hacer el ADN, mientras que en el ARN el uracilo reemplaza a la timina (fig. 9).

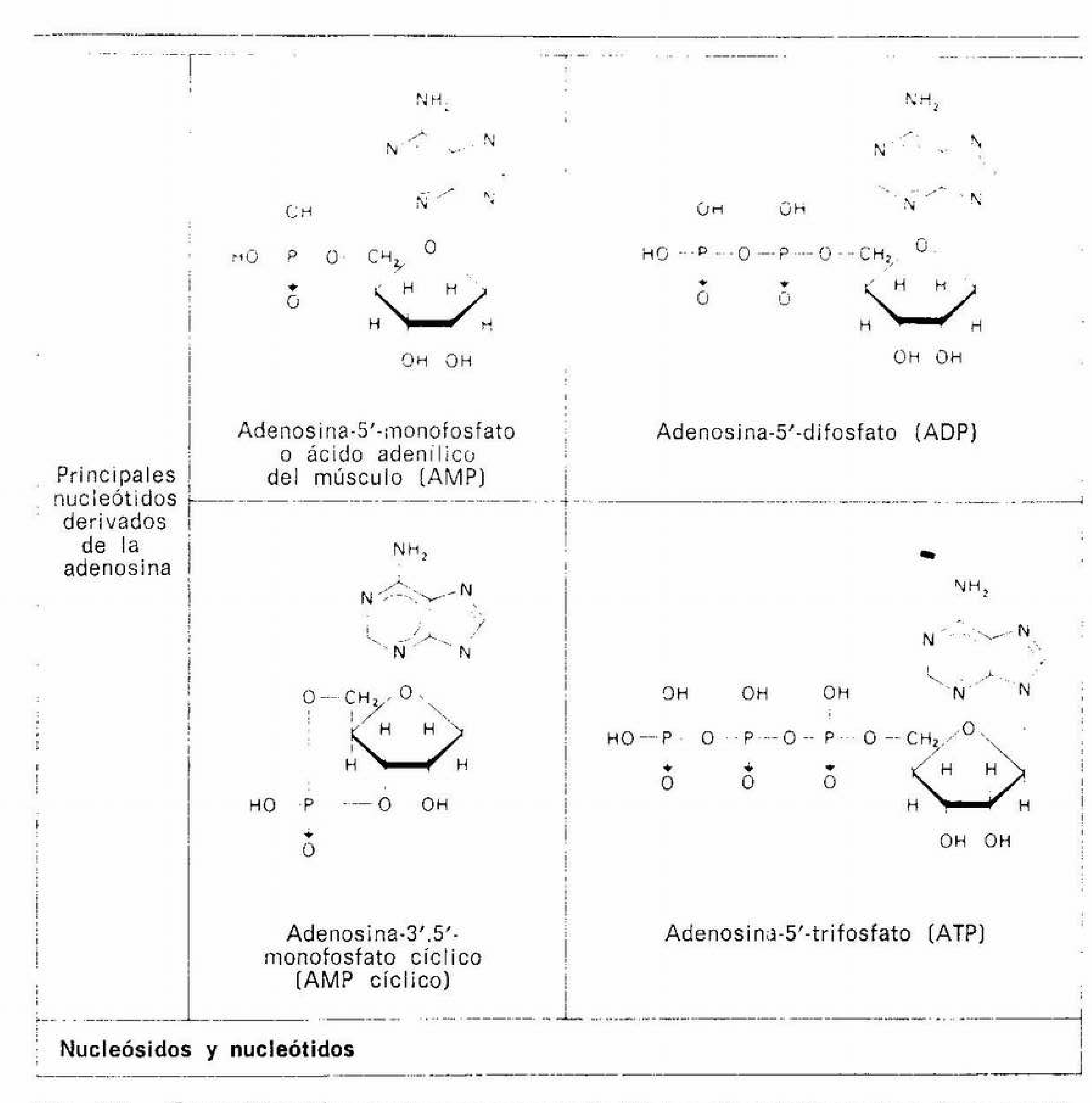


Fig. 10. *Constitución de los mononucleótidos di y trifosfatos.* Son moléculas que permiten el encadenamiento de las bases C, U, A, G. (Documento proporcionado por gentileza de *Encyclopaedia universalis*).

Un nucleótico es un eslabón de la cadena de ácidos nucleicos (3), según se acaba de decir, pero también está implicado en otra función celular. Asociado a otros dos fosfatos, constituye una molécula extremadamente importante en el mundo viviente: tiene por función el transporte de energía. Así, el adenosintrifosfato (ATP) representado en la figura 10 es la «moneda» o el «petróleo», el vector químico de la energía en la célula. La rotura de la función pirofosfatada libera energía allí donde se requiere: ATP→ADP + y la reacción inversa funciona allí donde la energía está disponible, por

ejemplo en las mitocondrias o en los cloroplastos*.

Los azúcares también pueden asociarse en largas macromoléculas: su función es constituir reservas energéticas (almidón de los granos, glicógeno del hígado) o un elemento arquitectónico (celulosa, ...). A título de ejemplo, a continuación, el glicógeno, polímero de la glucosa.

En cuanto a los lípidos, éstos son de tamaño mucho más pequeño que las macromoléculas que se acaba de observar. Se encuentran en las paredes celulares, en las diversas membranas, y sirven también de reservas nutritivas (las grasas).

Era indispensable describir sumariamente estos importantes constituyentes de los organismos vivientes, pero nuestro interés más específico se centra en el origen de estas moléculas biológicas.

FABRICACIÓN

La idea de un «caldo primitivo» en el que se habrían formado las moléculas constitutivas de los seres vivientes se debe ya a Charles Darwin (1871):.

«Si pudiésemos imaginar que, en una pequeña charca caliente, con toda clase de sales de amonio y de ácido fosfórico —en presencia de luz, de calor, de electricidad, etc.— se hubiese formado químicamente una proteína, dispuesta a sufrir cambios todavía más complejos...» (carta a Hooker) (4).

* Mitocondrias: gránulos aislados que representan uno de los elementos esenciales del metabolismo celular; cloroplasto: diminuto órgano propio de los vegetales verdes que desempeña un papel esencial en la fotosíntesis.

La misma idea la volvió a tomar Oparin más tarde (1924) al afirmar la ausencia de diferencia esencial entre la materia viviente y la materia no viviente. Haldane (1928), quien tuvo la misma idea, describía la formación de un caldo primitivo bajo el efecto de la radiación ultravioleta sobre la atmósfera terrestre primigenia.

Se han efectuado numerosas experiencias al objeto de formar, a partir de compuestos químicos simples (agua, amoníaco, metano), moléculas más complejas por medio de una aportación de energía (descarga eléctrica o radiación ultravioleta). En la experiencia más célebre, la de Urey y Miller (1953), la descarga eléctrica se da en un sistema que imita en cierta manera un conjunto de océano-atmósfera primitivo y origina 4 aminoácidos: glicina, analina, ácido aspártico, ácido glutámico.

En similares experiencias, Flores y Ponnamperuma han formado directamente cadenas de péptidos de 10 ácidos amínicos tras un experimento de una duración de 24 horas. Al mismo tiempo, aparecen otros compuestos importantes, bases nitrogenadas y azúcares. Si está presente el fosfato se observa la formación de nucleótidos mono, di y trifosfatados.

POLIMERIZACIÓN

La transición que lleva a las moléculas aisladas a formar una cadena de moléculas supone una eliminación de moléculas de agua. Una deshidratación semejante podría producirse sobre la Tierra bajo el efecto de la irradiación solar, si los componentes orgánicos fuesen depositados en las orillas del océano y absorbidos por una capa de arcilla.

Bernal, en su obra clásica, *Bases físicas de la vida,* supone que los componentes orgánicos formados en el océano habrían podido polimerizarse bajo el efecto catalítico de las superficies arcillosas. La idea de la polimerización en las orillas del océano, o sobre el fondo desecado de una laguna primitiva, ha sido verificada con éxito en el laboratorio. En una experiencia de simulación de un lecho desecado de laguna se han mezclado y calentado hasta los 125° C un nucleósido y un fosfato. Se ha producido la síntesis de un gran número de compuestos. Con fosfato de calcio, ha sido posible hacer la síntesis de polímeros constituidos por una cadena de diez moléculas. Estas experiencias parecen desempeñar un papel tan impor-

tante en la alternancia *medio húmedo-medio desecado* que se ha propuesto la necesidad de las mareas, es decir, la presencia de un satélite masivo que hiciese posible la aparición de la vida.

REPRODUCCIÓN

Para que se comprenda bien la importancia de las bases desde el punto de vista biológico, es necesario mostrar, al menos de manera sumaria, la forma según la cual las réplicas de moléculas orgánicas (reproducción idéntica) son engendradas por un mecanismo que puede repetirse, en cierto modo, hasta el infinito.

En el nivel molecular, la replicación de los seres vivientes se produce con arreglo al mismo mecanismo, mecanismo universal, entendido como válido para todos los seres vivos.

En todo ser viviente se encuentra, por una parte, una especie particular de polímero largo, el ADN, que porta bajo forma codificada las informaciones que determinan todos los componentes del organismo y de sus descendientes, y, por otra parte, los otros componentes celulares cuya síntesis dirige la traducción del mensaje inscrito en el ADN.

Un filamento de ADN no está solo, siempre va asociado a otra hebra de ADN, formando una especie de cuerda de dos hebras, la *doble hélice* cuyo descubrimiento valió el premio Nobel a Watson y Crick. Esta estructura puede existir porque ambas partes poseen una estructura complementaria, de modo que a cada una de las bases de una hebra corresponde específicamente una base complementaria en la otra.

Si la secuencia de una de las hebras es:

A A T G G C T

la de la otra será:

T T A C C G A

porque la adenina puede asociarse a la timina y la citosina con la guanina.

Este tipo de estructura desempeña un papel esencial en la conservación de la integridad del mensaje y en la fidelidad de la replicación del ADN.

El ADN es el apoyo químico de la información que dicta al organismo su metabolismo, su crecimiento y su reproducción. Las instrucciones están escritas en la ordenación secuencial de las bases nucleicas, A, T, G, C; el orden de las bases es el que define el mensaje genético como las notas de la música definen el mensaje sonoro en una partitura.

La transmisión de la información de una célula madre a una célula hija es posible gracias a la duplicación del ADN, que precede a la división celular. Este proceso se realiza merced a las proteínas, las *enzimas* especializadas. Se separan las dos cadenas de la hélice y cada una es copiada de nuevo. Se forman, pues, dos pares de doble hélice, cada una con dos cadenas, una antigua y otra nueva, recién formada. Las dos dobles hélices se alejan una de la otra y la célula se duplica.

Las enzimas que intervienen en la duplicación del ADN se fabrican a partir de las informaciones transportadas por el ADN mismo. El mensaje genético se expresa en dos etapas:

1. La cadena que porta el código del ADN es copiada primeramente en un ARN mensajero; el mensajero transporta una secuencia de bases complementarias de la del gen correspondiente en el ADN, excepto que el azúcar es la ribosa en lugar de la desoxirribosa y que las bases son la adenina, la citosina, la guanina y el uracilo, ocupando este último el lugar de la timina.
2. El ARN es leído entonces por el ribosoma, ordenamiento complejo de proteínas y de moléculas de ARN. El ribosoma eslabona uno detrás de otro a los aminoácidos conducidos hasta allí por pequeños ARN, los ARN de transferencia (fig. 11) según las instrucciones codificadas en la secuencia de bases del ARN mensajero. Es el fenómeno de la traducción.

La síntesis de la cadena polipeptídica se detiene cuando el ribosoma encuentra una señal de cese de traducción.

Las instrucciones que transportan los ácidos nucleicos quedan inscritas gracias a un lenguaje codificado. El código genético expresa la ley de correspondencia entre la secuencia de las bases en el gen y la de los aminoácidos en la proteína.

El código relativo a cada aminoácido en la proteína está constituido por una secuencia precisa de tres nucleótidos ribonucleicos o triplete. A cada aminoácido corresponde un triplete (o varios) o *codon* específico. Hay $4^3 = 64$ tripletes posibles formados a partir de

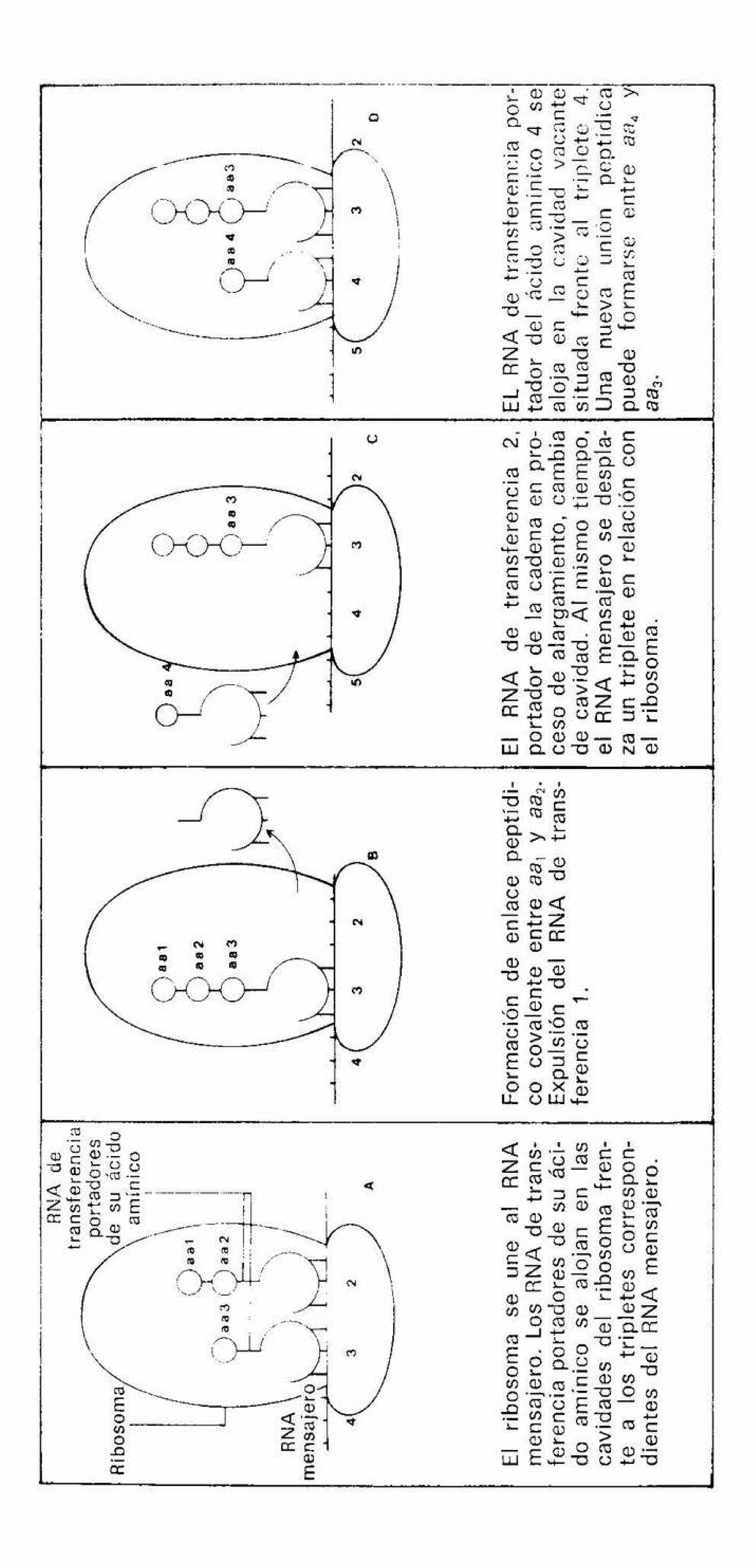


Fig. 11. *Enlace de los aminoácidos.* La «fábrica» de ribosomas enlaza uno a uno a los aminoácidos (cadena peptídica). Por cada aminoácido, haya una identificación del ácido amínico correspondiente a un codon, después se coloca en su lugar; a continuación todo el sistema de ribosomas se desplaza sobre el codon siguiente y continúa la colocación.

base o nucleótido inicial (extremidad 5')	*base o nucleótido central*				*base o nucleótido final (extremidad 3')*
	U	C	A	G	
U	Fe Fe Leu Leu	Ser Ser Ser Ser	Tir Tir Sin sentido Sin sentido	Cis Cis Sin sentido Trip	U C A G
C	Leu Leu Leu Leu	Pro Pro Pro Pro	His His GluN GluN	Arg Arg Arg Arg	U C A G
A	Ileu Ileu Ileu Met	Tre Tre Tre Tre	AspN AspN Lis Lis	Ser Ser Arg Arg	U C A G
G	Val Val Val Val	Ala Ala Ala Ala	Asp Asp Glu Glu	Gli Gli Gli Gli	U C A G

Ala: alanina	Fe: fenilalanina	Ileu: isoleucina	Ser: serina
Arg: arginina	Glu: ácido glutámico	Leu: leucina	Tre: treonina
Asp: ácido aspártico	GluN: glutamina	Lis: lisina	Trip: triptófano
AspN: asparagina	Gli: glicina	Met: metionina	Tir: tirosina
Cis: cisteina	His: histidina	Pro: prolina	Val: valina

— El código genético. Según una disposición que ya es tradicional, la tabla se lee de izquierda a derecha: la base inicial a la izquierda, la base central en una de las cuatro columnas del centro y la base terminal a la derecha; así se ve que UUU corresponde a la fenilalanina (Fe); CUU a leucina (Leu), etc. Los tres tripletes denominados «sin sentido» sirven de signos de puntuación.

Fig. 12. El código genético consiste en 64 tripletas de 3 bases (4 bases tomadas 3 a 3 dan $4 \times 4 \times 4 = 64$ tripletes). Cada triplete codifica una aminoácido, salvo tres tripletes que forman un signo «fin» del mensaje. (Documento proporcionado por gentileza de *Encyclopaedia universalis.*)

4 bases. Entre estos tripletes, 3 constituyen una orden de terminación de una cadena. Los otros 61, con una determinada redundancia (fig. 12) definen los 20 aminoácidos que pueden entrar en una cadena proteica.

Hasta que se descubren algunas excepciones a la universalidad del código genético en las mitocondrias de diversos organismos y más recientemente en el macronúcleo de los paramecios (1985) se admitía, como afirmaba Jacques Monod, que lo que era cierto para la bacteria, también lo era para el elefante. Estos descubrimientos de anomalías de lectura en los codones son importantes porque llevan a reconsiderar el problema, pero eso no afecta en nada al mecanismo de traducción en proteínas del mensaje genético. En las células vivientes, pues, el ADN se duplica gracias a las proteínas y las proteínas se sintetizan según las instrucciones transportadas por el ADN. Las interacciones ADN-ARN-proteínas son, por tanto, muy estrechas. ¿Cuál estuvo en el origen de la vida? ¿Cuál es la molécula que se replicó primero?

ESTRUCTURAS Y SISTEMAS DINÁMICOS

Habiendo establecido lo esencial del funcionamiento del sistema de replicación de las proteínas, hemos de abordar ahora el problema del origen de este sistema. Nos encontramos ante el problema evocado más arriba de la *producción de orden*. Lo esencial es comprender cómo aparecen estructuras: éstas son el producto de la evolución de sistemas dinámicos.

Estructuras en el espacio

Partamos de un ejemplo clásico extraído de la mecánica de los fluidos. Cuando se echa aceite en una sartén de fondo muy plano y se calienta uniformemente, si se domina bien el sistema de calentamiento, pueden verse aparecer células convectivas hexagonales, las famosas células de Bénard. La dimensión de estas células está determinada en absoluto por el espesor de la capa fluida y sus propiedades: viscosidad y conductibilidad térmica. La aparición de los hexágonos está unida a una rotura de simetría en relación con el plano mediano de la capa líquida tal como, por ejemplo, la dependencia de la viscosidad en relación con la temperatura.

El motor del movimiento del fluido radica en la fuente de calor situada en la base del líquido. Pero el fluido sólo se pone en movimiento cuando el flujo de calor pasa a ser lo bastante grande. Para un determinado valor del flujo de calor, el sistema se encuentra ante una «doble opción»: el calor es transportado por el sistema de conducción o bien es transportado, a la vez, por conducción y por convección.

El primer estado es inestable, ya que la menor perturbación pone el fluido en movimiento. Incluso las fluctuaciones estadísticas bastan para iniciar la formación de células convectivas.

En el momento en que el sistema se convierte en inestable, las velocidades, en función del tiempo, crecen en el fluido en progresión geométrica (por ejemplo, la velocidad se dobla en cada intervalo de tiempo sucesivo). En muy poco tiempo se establece un nuevo régimen estacionario. El paso de un tiempo a otro aparece como una opción entre dos posibilidades: se afirma que existe una bifurcación. Si se fuerza el régimen térmico aumentando el flujo de calor, se complican las cosas, puesto que aparecen nuevas inestabilidades que se desarrollan con rapidez.

En el paso de un régimen a otro, la progresión geométrica (o crecimiento exponencial) desempeña, de hecho, un papel fundamental, permitiendo a un nuevo estado del sistema ganar un poco de tiempo sobre el estado precedente.

Competición entre dos especies

Una estructura puede mostrarse bajo la forma de la dominación de una especie sobre otra; entonces se presenta bajo una forma puramente numérica y no como realización en el espacio. Un ejemplo, que se destaca en el repertorio de las anécdotas matemáticas, es el siguiente, debido a Lasry y Azencott:

Dos especies de caracoles, blancos y negros, están en el fondo de un pozo. Tratan de salir de él y cada día avanzan un metro. Por la noche se detienen pero su mucosidad se seca, algunos caen al fondo del pozo y mueren. En la época inicial la proporción de blancos y negros que caen es la misma. No existe selección. Supongamos una pequeña modificación climática según la cual el 98 % de los blancos son capaces de proseguir su ascensión y tan sólo el 97 % de los negros. ¿Al cabo de cuánto tiempo este sistema de se-

lección no habrá dejado subsistir más que un caracol negro por cada cien, diez mil o un millón de caracoles blancos?

1 por 100	460 noches, o sea 1 año y 3 meses
1 por 10.000	921 noches, o sea 2 años y 6 meses
1 por 1.000.000	1.381 noches o sea 3 años, 9 meses y medio.

(Resulta inútil imaginarse un pozo de 1.381 metros, basta con pensar que el sistema de selección es continuo.)

Se ve que la raza de caracoles negros está abocada a la extinción y a dejar el lugar a los caracoles blancos, a pesar de la muy débil ventaja de estos últimos. Esta función discriminatoria de la progresión geométrica permite comprender cómo un cambio de régimen en un sistema dinámico tiene un efecto selectivo.

Estructura biológica: moléculas dominantes

Volvamos al problema del origen de la vida. La aparición accidental en una gota de agua, en la pequeña charca caliente de Darwin, Oparin y Haldane, de una cadena molecular, aunque fuese una sola, desempeñando el papel de molde fabricante de réplicas, basta para alterar el balance químico. En un tiempo muy corto, todas las moléculas disponibles son utilizadas e introducidas en cadenas moleculares idénticas.

Naturaleza de los sistemas dinámicos

El mecanismo que acabamos de describir es, en el momento actual, una simple conjetura y vamos a tratar de establecer solamente aquello que la hace plausible. Para esto abordaremos el problema desde dos ángulos diferentes.

El sistema de replicación de las moléculas vivientes por el ADN funciona en los seres vivos y sólo en los seres vivos. ¿Puede concebirse una evolución partiendo de un medio abiótico? En las páginas que siguen veremos en detalle cómo la teoría de la información sirve para hacerse una idea de lo posible y de qué manera la teoría de los sistemas dinámicos, que anteriormente hemos esbozado, puede explicar, por la aparición de sucesivas bifurcaciones, el fenómeno de selección. A continuación veremos en profundidad, en razón de su importancia, cómo se explica la disimetría derecha-izquierda; la amplificación de la disimetría derecha-izquierda parece explicable en el cuadro de la teoría de los sistemas dinámicos.

INFORMACIÓN

Sin duda todavía existe mucha distancia entre los ácidos amínicos, las bases, los ácidos nucleicos, los azúcares y los seres vivos. El hecho de haber reunido las piezas del rompecabezas no significa que se le haya dado solución, ni siquiera que se haya comprendido cómo se ha construido sobre la Tierra. Sin embargo, cierto número de funciones esenciales de los elementos del rompecabezas resulta conocido, lo cual, por supuesto, facilita la orientación y el planteamiento de los problemas.

¡El planteamiento de los problemas!

Por una parte, los fenómenos biológicos plantean una formidable cuestión de principio: ¿Cómo ha podido surgir el orden biológico de un aparente desorden? Por otra parte, una gran cantidad de cuestiones técnicas: ¿De qué manera se han franqueado las etapas que van desde el sistema abiótico a la vida? Estas últimas cuestiones no tienen más que respuestas parciales, del tipo que hemos descrito hace poco: formación de ácidos amínicos, formación de pequeñas cadenas peptídicas, formación de nucleótidos, formación de azúcares.

Asimismo, para saber de qué hablamos es necesario referirse a la teoría de la información. La teoría de la información se desarrolló a fin de ayudar a concebir los canales de comunicación y los códigos que los utilizan. Como tal, la teoría de la información trata propiedades matemáticas de un mensaje o *secuencia de símbolos* y no se preocupa del *significado*.

La definición de información contenida en un mensaje se formula de forma tal que satisfaga dos condiciones evidentes: la cantidad de información debe ser proporcional a la longitud del mensaje y debe crecer con la riqueza del alfabeto que sirve para codificar dicho mensaje.

Imaginemos un alfabeto de dos letras. Para hacer comprender «físicamente» el empleo de este alfabeto, tomamos el ejemplo clásico del cerrojo abierto —T— o cerrado —P—.

Consideremos ahora una puerta cerrada, por ejemplo, por dos cerrojos. Si ambos cerrojos están en la posición adecuada, la puerta

puede abrirse girando el picaporte. Imaginemos una experiencia en la que el sujeto ignora si los pasadores están en la posición adecuada. Cada cerrojo tiene dos posiciones: existen dos cerrojos, por consiguiente las combinaciones posibles son $2^2=4$. Las combinaciones pueden escribirse de la forma siguiente:

T T
T P
P T
P P

y sólo una de ellas (por ejemplo T T) franquea la puerta.

Si hay tres cerrojos, el número de combinaciones es $2^3=8$ y las combinaciones se escribirán:

T T T
T T P
T P T
P T T
P T P
P P T
T P P
P P P

y solamente una de ellas (por ejemplo TTT) franquea la puerta.

Si hay veinte cerrojos, el número de combinaciones es de 2^{20} (aproximadamente un millón de combinaciones).

El conjunto de estas dos letras, P y T, se denomina un «bit» y la cantidad de información contenida en los mensajes es el número de bits. Se puede decir que dos pasadores transportan una cantidad de información igual a 2; tres pasadores transportan una cantidad de información igual a 3, etc.

Imaginemos un alfabeto que tenga k símbolos y un mensaje de n letras. El número total de permutaciones de k símbolos alfabéticos tomados por grupos de n es:

$$N=K^n$$

N es el número de mensajes posibles. La cantidad de información contenida en el mensaje se expresa por medio del número de

bits H, definido por la potencia de 2, 2^H, igual al número de permutaciones de k símbolos alfabéticos tomados por grupos de n:

$$2^H=k^n \text{*}$$

La información contenida en un mensaje es proporcional a su longitud y al logaritmo del número de símbolos en el alfabeto utilizado: $\log_2 k$ es la cantidad de información contenida en cada símbolo.

Es importante observar que (1/N) es la probabilidad de que una secuencia al azar de n símbolos transporte el mensaje deseado. En tal sentido, un mensaje dotado de un significado es un acontecimiento improbable.

EJEMPLOS BIOLÓGICOS Y OTROS

Proteínas. 20 aminoácidos entran en una cadena peptídica o proteína. Se tiene, pues, un *alfabeto* de 20 símbolos, $k=20$. Una proteína de 100 aminoácidos transporta una cantidad de información H,

$$2^H=20^{100}$$
$$H=432$$

De manera general, para una cadena de n aminoácidos, la cantidad de información es:

$$H=n \log_2 k=4{,}32\ n$$

ARN. Si se considera un ácido ribonucleico mensajero, portador de $n=1.200$ bases nucleicas, siendo el número de bases diferentes igual a 4, el número de genes posibles de esta longitud, suponiendo igualmente probables todas las combinaciones, es el enorme número:

$$N=4^{1.200}=2^{2.400}=10^{722{,}5}$$

* O bien, $H = n \log_2 k=(n \log k) \log 2$
$\log_2 k$ es el logaritmo de base 2 de k, y log el logaritmo ordinario (decimal).

La cantidad de información contenida en el mensaje genético de un gen es del orden de:

$$H = 2.400 \text{ bits}$$

Bacteria. Una bacteria muy estudiada desde el el punto de vista genético, la *Escherichia coli (E. coli)*, posee unos 2.500 genes de 1.200 bases nucleicas. La cantidad de información contenida en el mensaje genético de *E. coli* es:

$$H = 6 \text{ millones de bits}$$

Hombre. Con 100.000 genes, la cantidad de información transportada por el código genético humano es de:

$$H = 720 \text{ millones de bits}$$

Conjunto de grandes bibliotecas mundiales. Con diez millones de obras por biblioteca y una docena de bibliotecas como la del Museo Británico, la del Congreso de los Estados Unidos o la Nacional francesa, la cantidad de información se puede estimar en:

$$H = 100 \text{ billones de bits}$$

De esta forma se puede elaborar una tabla de las cantidades de información que comportan las diferentes estructuras:

Estructura o secuencia	*Número de casos o estados posibles*	*Cantidad de información*
Una molécula aislada	1	0
Cerrojo	2	1
Base nucleica	4	2
Aminoácidos	20	4,32
ARN de transferencia	$4^{75} = 10^{45}$	150
Gen (proteína)	$10^{722.5}$	2.400
Virus (50 genes)	$10^{36\,000}$	120.000
E. coli (2.500 genes)	$10^{1\,800\,000}$	6 millones
Hombre (100.000 genes)	$10^{72\,000\,000}$	240 millones
Bibliotecas	$10^{3.000\,000\,000\,000}$	10 billones

REDUNDANCIA

La presencia de *sinónimos* es una importante característica de todos los fenómenos biológicos. Esta presencia de sinónimos, cuyo ejemplo típico es el código genético, se conoce con el nombre de degeneración. Este término quiere decir que existen diversas maneras de referirse al mismo concepto. El término de *redundancia*, menos técnico, tiene igual sentido y, si se utiliza en el lenguaje cotidiano, posee la ventaja de no ser peyorativo.

El código genético se basa en el reconocimiento de los aminoácidos por medio de 4 bases nucleicas tomadas en grupos de 3: los *codones*. Ya hemos visto que existen $4^3 = 64$ combinaciones de bases nucleicas para reconocer 20 aminoácidos, además de las palabras «comienzo» y «fin». Existen, pues, diversas palabras de 3 letras que son sinónimas para codificar tal o cual aminoácido (ver figura 11). Vamos a centrarnos en este esquema, aunque el descubrimiento de los antónimos del paramecio, obviamente, acaba de complicar el panorama.

Se puede evaluar el grado de redundancia comparando la cantidad de información contenida en una cadena de n bases nucleicas y en una cadena de $(n/3)$ aminoácidos. Existen 4^n combinaciones de las 4 bases nucleicas en una cadena de n bases, es decir una cantidad de información:

$$H\ (\text{ARN}) = 2n$$

Esta cadena permite reproducir una cadena de $(n/3)$ aminoácidos, con un número $20^{(n/3)}$ de combinaciones, es decir una cantidad de información:

$$H\ (\text{proteína}) = (n/3) \cdot 4{,}32 = 1{,}44\ n$$

En la traducción

codones → ácidos amínicos

se ha perdido cierta cantidad de información,

$$H\ (\text{ARN}) - H\ (\text{proteína}) = 0{,}56\ n$$

Para un gen tipo de 1.200 bases nucleicas, la pérdida de información es de, más o menos, 671 bits. Físicamente se trata de una

redundancia del sistema de traducción. Esta pérdida de información del código genético puede tener cierta importancia en lo que respecta al origen de la vida. Si entre todas las cadenas posibles de *n* ácidos amínicos *una sola* transportase tal significado, entonces la cantidad de información que contendría sería dada por la relación:

$$H = n \log_2$$

Si la vida hubiese comenzado así, a partir de una sola cadena, cabría, en principio, encontrar su origen. En términos físicos un origen semejante sería no degenerado (diremos aquí no redundante).

En realidad, la vida sobre la Tierra constituye un proceso sumamente redundante, y tal redundancia se constata a todos los niveles en los seres vivos. La vida es la propiedad de millones de genes diferentes. Es posible que, en su mismo origen, la vida haya estado muy marcada por la redundancia. De hecho, es posible que la vida haya aparecido de manera independiente diversas ocasiones en la Tierra primitiva, pero que sólo una de estas apariciones haya dado por descendencia todas las formas de vida actuales.

EVOLUCIÓN (5)

La evolución, desde el más antiguo ser vivo fósil identificado, *Eobacterium isolatum* (hace tres mil millones de años), hasta la secesión del chimpancé y del hombre (hace 300 millones de años), ha estado determinada por un aumento progresivo del número de nucleótidos, debido con toda probabilidad a una multiplicación de los genes.

El mecanismo del incremento de la información en los sistemas vivos, extrapolado hacia el pasado, lleva a imaginarse un ser vivo primitivo, primer eslabón de la cadena que conduce a los primeros organismos vivos conocidos. El punto de partida podría ser, como hemos mencionado anteriormente, la aparición de una molécula susceptible de ser recopiada. *A partir de este momento, la química del azar fue reemplazada por la evolución darwiniana* (es decir, modificación progresiva del mensaje genético y supervivencia de los grupos más aptos).

Estimar la cantidad de información máxima que contuvo semejante molécula es de una importancia fundamental. Esto permite establecer los hitos del origen de la vida.

¿Cuántas cadenas peptídicas pudieron aparecer? El número máximo de cadenas está limitado por el número de átomos de carbono disponibles. Si se admite la presencia de 10^{44} átomos de carbono en los océanos primitivos, el número de ácidos amínicos puede estimarse en un máximo de 10^{43}. Si se admite que las moléculas actúan a razón de una reacción (captura o rotura de la cadena) cada centésima de segundo durante 500 millones de años, es posible estimar a la vez el número probable de moléculas diferentes susceptibles de formarse y la longitud de la cadena que proporciona todas estas combinaciones, es decir, $1{,}4 \cdot 10^{56}$ moléculas, constituidas por una cadena de 42 aminoácidos de media. Con 20 especies de ácidos amínicos, esto corresponde a una cantidad de información H dada por $2^H = 20^{42}$, es decir:

$$H = 182 \text{ bits}$$

Parece, por tanto, imposible que la Tierra prebiótica haya sido el lugar de producción de un sistema que contuviese más de 200 bits de información. Estamos muy lejos de la verdad si consideramos que microorganismos como *Escherichia coli* poseen 6 millones de bits.

La idea esencial entonces es la aparición de una molécula (o moléculas) relativamente simple, pero que pueda ser copiada: una vez que la experiencia ha tenido éxito, la producción de copias domina todos los procesos subsiguientes.

A partir de la cantidad de información máxima presente sobre la Tierra primitiva, es posible concebir el sistema más pequeño de moléculas capaz de realizar las copias. Con 4 ARN de transferencia que permitan el reconocimiento de 4 aminoácidos y un ARN mensajero que comporte sólo 23 codones de 3 bits, cabe imaginar un sistema de 161 bits capaz de reproducción. A partir de ahí, puede comenzar una evolución protodarwiniana caracterizada por un gran número de mutaciones y por el incremento de los pesos moleculares. El principal inconveniente de este modelo es la facilidad con la que un ácido amínico de la cadena nucleica puede ser reemplazado por otro durante el encuentro de dos especies susceptibles de replicación. Tal fenómeno, conocido bajo el nombre de hibridación, es destructor de los caracteres de reproducción favorables. Es preciso admitir, pues, la presencia de nichos donde se elaboran las mejores formas reproductoras antes de ser transferidas a un medio en el que puedan desarrollarse.

LAS EXPERIENCIAS DE OPARIN (6)

En el intercambio entre un sistema organizado y un medio ambiente caótico, el crecimiento de la organización en un determinado lugar va acompañado necesariamente de un aumento de desorden en otro punto. Esto es únicamente posible porque el sistema organizado permanece abierto, intercambiando de manera constante materia y energía con el medio ambiente.

Realizar simulaciones en las que se manifieste una enorme desviación en el equilibrio termodinámico permite imaginarse la forma en que pudieron crearse ciertos sistemas arcaicos.

Si se mezclan soluciones acuosas de dos o tres materias orgánicas de peso molecular elevado (por ejemplo, proteínas, ácidos nucleicos o azúcares) se ve que se enturbian. Las moléculas en solución se aglomeran en enjambres y en amontonamientos moleculares. Cuando un amontonamiento alcanza determinadas dimensiones, se separa de la solución formando una gota visible al microscopio. Estas gotas de coacervados* contienen casi toda la masa de los polímeros utilizados para la experiencia.

En presencia de una enzima, las gotas de coacervado son susceptibles de entrar en reacción con el medio exterior. En un experimento realizado por Oparin, se toma una gota formada por proteína y almidón soluble. Se sumerge dicha gota en una solución de monofosfato de glucosa que difunde el medio circundante hacia el interior de la misma.

En presencia de un catalizador *a*, la glucosa se polimeriza en almidón (el fosfato inorgánico, separado, vuelve al medio exterior) y la gota aumenta de tamaño gracias al almidón que se ha formado. Pero si en la gota está presente otro catalizador *b*, el almidón se descompone produciendo maltosa que parte hacia el medio exterior en el que antes no existía. De esta forma, a través de la gota, se crea un flujo de materia que simula de manera muy simplificada un intercambio biológico. Más aún, siguiendo la actividad relativa de los catalizadores *a* y *b*, la gota puede aumentar o, por el contrario, disminuir e incluso desaparecer.

Al comparar dos especies de gotas diferentes, de las que una poseía una combinación de catalizadores mucho más complicada y perfeccionada que la otra, Oparin vio aumentar de tamaño las gotas más avanzadas, mientras que las otras detenían su crecimiento o incluso se desintegraban. Según Oparin, esta experiencia simula un mecanismo de selección natural prebiológico de los antecesores de la vida que antaño surgieron en la superficie terrestre.

* Sistema líquido en diversas fases, constituido por capas superpuestas de soluciones coloidales de diferente concentración.

La síntesis de largas cadenas de ácidos amínicos conseguida, pongamos, calentando a 150° una mezcla de ácidos amínicos sobre un trozo de lava (escogido en razón de sus propiedades catalíticas y su origen natural) permite obtener polipéptidos cuyos radicales se siguen en un orden determinado. Tales cadenas pueden presentar una actividad enzimática, por ejemplo, haciendo posible la fijación del radical monovalente (carboxilación). La presencia de una molécula

$$-C\begin{matrix} \nearrow O \\ \searrow OH \end{matrix}$$

que permite una acción enzimática, da a un eobionte* el privilegio de crecer más rápidamente que los demás coacervados. La evolución de estos sistemas poseedores de un metabolismo primitivo habría terminado por desembocar en sistemas capaces de una autorreproducción exacta: el mundo de los seres vivos.

SIMETRÍA

En las tiendas de artículos de broma se venden sacacorchos que funcionan hacia la izquierda; para introducirlos en el tapón hay que hacerlos girar en sentido inverso al habitual. Los sacacorchos corrientes funcionan haciéndolos girar hacia la derecha, en el sentido de las agujas del reloj.

El sacacorchos «zurdo» es la representación de un sacacorchos corriente en un espejo. En el espejo, mi mano derecha se convierte en la mano izquierda de mi imagen; no son más superponibles que un guante derecho y un guante izquierdo.

* Sistema prebiológico arcaico.

De los 20 ácidos amínicos que se encuentran en los seres vivos, sólo uno es simétrico, mientras que 19 pueden existir bajo una forma derecha o bajo una forma izquierda, imágenes de espejo una de la otra. Ahora bien, los seres vivos están constituidos preferentemente de ácidos amínicos izquierdos (levógiro o L) y de manera más general de moléculas izquierdas (L). Una observación importante es la siguiente: las bacterias, seres microscópicos hechos de proteínas L, están protegidas del exterior por una delgada concha de moléculas D. Los antibióticos están elaborados también de moléculas D, de tal modo que se ha escrito que, si bien los seres vivos están constituidos de moléculas L, la *defensa* y el *ataque* lo están de moléculas D.

La causa de la predominancia de las moléculas L se lleva investigando desde hace más de un siglo. Pasteur, tras experimentos de todo punto interesantes (1849-1850), había separado el ácido tartárico derecho del ácido tartárico izquierdo. En realidad, desde el punto de vista de su constitución existen tres ácidos tartáricos:

$C-O_2H$	$C-O_2H$	$C-O_2H$
$H-C-OH$	$HO-C-H$	$H-C-OH$
$HO-C-H$	$H-C-OH$	$H-C-OH$
$C-O_2H$	$C-O_2H$	$C-O_2H$
(D)	(L)	(simétrico)

la mezcla de ácido D y de ácido L en cantidad idéntica se denomina «racémica». El ácido tartárico D se halla muy difundido en el mundo vegetal y, en particular, en el zumo de uva, del que se separa en el transcurso de la fermentación bajo la forma del ácido tartrato de potasio poco soluble (el tártaro de los vinos).

Pasteur hizo cristalizar la mezcla racémica del tartrato doble de sodio y de amonio a una temperatura inferior a 27° y obtuvo cristales de tartrato doble derecho y de tartrato doble izquierdo. Le fue posible entonces, con la ayuda de unas pinzas, examinar mediante una lupa cristales derechos e izquierdos basándose en la disposición de las facetas de los cristales.

El ácido tartárico D o L puede transformarse espontáneamente

en una mezcla, lo que se denomina racemización. Las proteínas de los seres vivos no son del todo estables y, por ejemplo, un tipo de cataratas se debe a la racemización lenta de una proteína que se halla en el ojo (el ácido L aspártico tiene una tasa de racemización de 0,14 % por año: hablando en términos generales, el envejecimiento podría deberse a la racemización de las proteínas en el ser vivo).

Esta racemización espontánea hace más difícil todavía comprender la aparición de la *quiralidad* (término debido a Kelvin [1904] y que designa la orientación de las moléculas) en lo viviente. En las notas de Pasteur se encuentra la observación según la cual «la disimetría cósmica es el origen de la disimetría de la naturaleza».

En sus estudios sobre las simetrías, P. Curie (1894) enuncia dos importantes proposiciones:

«Cuando ciertas causas producen ciertos efectos, los elementos de simetría de las causas deben encontrarse en los efectos producidos», y «cuando ciertos efectos revelan una cierta disimetría, esta disimetría debe encontrarse en las causas que le han dado nacimiento».

Al objeto de ilustrar estos principios (7) recordemos que la pérdida de simetría a veces puede explicarse por una minúscula disimetría inicial cuyos efectos son amplificados espectacularmente. Éste es, por ejemplo, el caso en la proximidad de un equilibrio inestable: si un lápiz se coloca en equilibrio sobre su punta, terminará por caer. La orientación de su caída es el resultado de una pequeña disimetría inicial. Tal es el tipo de razonamiento que siguen los bioquímicos cuando tratan de explicar la quiralidad de las moléculas biológicas por el efecto de una pequeña disimetría amplificada de modo espectacular (volveremos a este tema más adelante).

Pero existe en la naturaleza una rotura espontánea de la simetría que responde a aquella *disimetría cósmica* de la que hablaba Pasteur y que presentaremos a continuación.

LA RADIACTIVIDAD BETA Y LA ROTURA DE SIMETRÍA

Hemos hecho mención más arriba al sacacorchos «derecho» y al sacacorchos «zurdo», imágenes el uno del otro como la mano derecha lo es de la mano izquierda en un espejo. Sin embargo, no

está todo dicho sobre la simetría, puesto que es preciso atender no sólo a las formas, sino también a las leyes de la física.

A fin de evidenciar lo que la radiactividad beta posee de específico, comenzaremos por examinar un caso clásico, el de la imagen reflejada en el espejo de una corriente eléctrica y de un campo magnético.

Consideremos, pues, una corriente eléctrica vertical dirigida hacia lo alto (fig. 13). Produce un campo magnético horizontal. Las líneas de fuerza del campo magnético forman círculos y el campo magnético está orientado en el sentido inverso de las agujas del reloj. La imagen de la corriente eléctrica en un espejo horizontal da una corriente eléctrica vertical dirigida hacia abajo; esta corriente produciría un campo magnético orientado en el sentido de las agujas del reloj. La imagen de la corriente eléctrica reflejada en el espejo hace cambiar a ésta de sentido; esto es lo que cabría esperar, pero el campo magnético que se encuentra en el plano del espejo cambia también de sentido, lo que, en cierto modo, es inesperado. La representación del campo magnético debe tener en cuenta este hecho: cuando se reproduce la imagen de un campo magnético en un espejo, es preciso efectuar un cambio de signo suplementario (figura 13). Si se tiene en cuenta el cambio de signo suplementario, se observa que los fenómenos electromagnéticos son *invariantes* en una simetría plana. Se dice entonces que existe «conservación de la paridad».

Examinemos ahora el fenómeno de radiactividad beta en el que un elemento radiactivo emite un electrón, por ejemplo:

$$\text{Potasio } 40 \rightarrow \text{Argón } 40 + e^{+}$$

La conservación de la energía obliga a admitir (Pauli, 1931) la presencia de otra partícula, de masa nula o muy pequeña, el neutrino (ver pág. 26) de manera que la transición radiactiva en el ejemplo anterior debe escribirse:

$$\text{Potasio } 40 \rightarrow \text{Argón } 40 + e^{+} + \text{neutrino}$$

Valga recordar aquí que el neutrino interacciona muy difícilmente con la materia.

La interacción electrón-neutrino se debe a una fuerza de muy pequeño alcance, designada con el nombre de *interacción débil*. El neutrino gira sobre sí mismo, con la particularidad de que su eje de

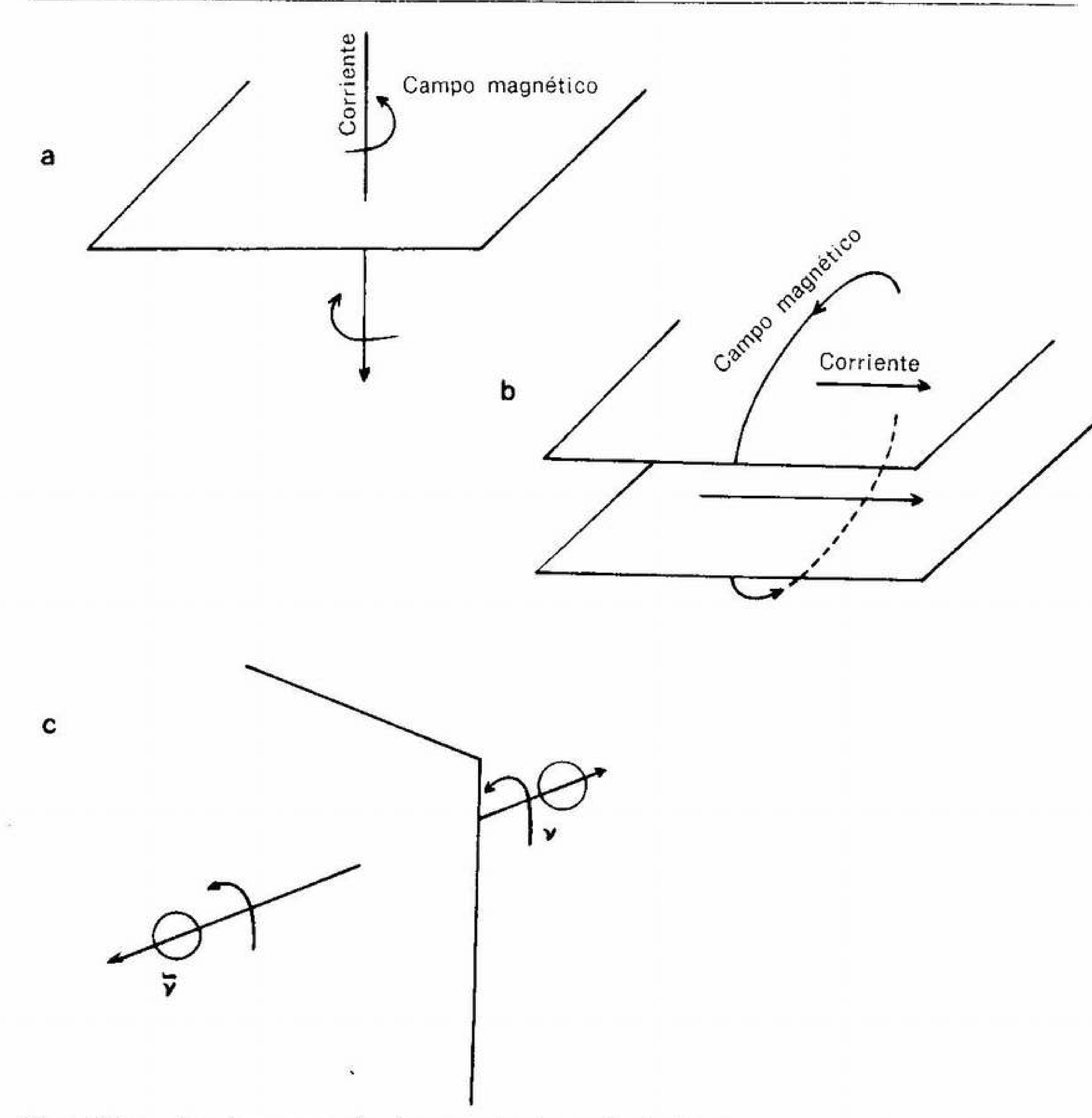


Fig. 13a. La imagen de la corriente reflejada en un espejo produce un campo magnético de sentido inverso: la imagen del espejo del campo magnético *no* es el campo magnético de la imagen del espejo de la corriente. Es preciso efectuar un cambio de signo del campo magnético.

Fig. 13b. La imagen de la corriente reflejada en un espejo produce un campo magnético que no es la imagen del espejo del campo magnético. Es preciso asimismo efectuar un cambio de signo sobre la imagen del espejo del campo magnético.

Fig. 13c. La imagen del neutrino reflejada en el espejo (que gira a la izquierda en el sentido del movimiento) es un antineutrino (que gira a la derecha en el sentido del movimiento). No hay inversión del sentido de rotación en la imagen del espejo del neutrino. Se dice que hay rotura de simetría.

rotación es siempre paralelo a su velocidad y su sentido de rotación invariable. Si se considera la imagen de un neutrino en un espejo perpendicular a la dirección de su movimiento, se cambia de sentido la velocidad: el sentido de rotación se conserva en la imagen del espejo y se observa, pues, que ha cambiado en relación con la velocidad: la imagen del neutrino en el espejo es un antineutrino del que se dice que gira a la derecha, mientras que el neutrino gira a la izquierda (fig. 13). Se habla entonces del término rotura de simetría.

Esta rotura de simetría del neutrino afecta también a los electrones. Los electrones negativos poseen una ligera predilección por una quiralidad izquierda, la dirección del eje de la peonza-electrón está preferentemente orientada en sentido opuesto a la velocidad (en otros términos, no hay un número igual de electrones que giren a derecha e izquierda en relación con la dirección del movimiento), el eje de la peonza-positrón está preferentemente orientado en el mismo sentido de la velocidad. Existe de igual modo rotura de simetría para el electrón (demostrado mediante el estudio de la transición $^{60}Co \rightarrow {}^{60}Ni$) y para el positrón (demostrado mediante el estudio de la transición $^{58}Co \rightarrow {}^{58}Fe$).

En razón de esta rotura de simetría cabe esperar que se produzcan diversos efectos que, con más o menos éxito, han sido mencionados para explicar la quiralidad de las moléculas orgánicas:

— la quiralidad de los electrones emitidos en la radiactividad beta produce una polarización circular de la radiación de frenado (rayos X) que, actuando sobre las mezclas racémicas, disocia con preferencia los componentes D, llevando consigo un enriquecimiento en moléculas L;

— la polarización de la radiación, como la quiralidad de los electrones, podría producir una cristalización preferencial de las moléculas L;

— la energía de enlace de las moléculas L es algo mayor que la energía de enlace de las moléculas D (del orden de una milmillonésima de milmillonésima de electrón-voltio, mientras que la energía de enlace de una cadena de carbono es del orden de 0,1 electrón-voltio) pero, en condiciones favorables, podría engendrar la formación de cadenas de moléculas L. Esta última hipótesis parece la más válida, como veremos más adelante.

De hecho, son posibles otras roturas de simetría, en aquellos sistemas cuya imagen reflejada en el espejo no invierte al mismo tiempo todas las propiedades. Así ocurre en la combinación campo de gravedad y rotación, campo magnético terrestre y rotación.

Amplificación de la quiralidad

La experiencia de Miller y Urey da una cantidad igual de ácidos amínicos derechos e izquierdos (D y L). ¿Es posible que partiendo de una mezcla (D, L) de cantidades idénticas se desemboque en un sistema que esté dominado por las moléculas L o incluso constituido por las moléculas L solamente?

De manera general, en las experiencias de laboratorio, a partir de compuestos que carecen de orientación privilegiada, se obtiene siempre la *mezcla racémica:* proporciones iguales de la molécula derecha y de la molécula izquierda.

El origen del predominio en lo viviente de las moléculas L (izquierdas o levógiras) parece que en el momento actual ha recibido sólo tres explicaciones:

1. Un accidente estadístico ha privilegiado la formación de las moléculas L.

Es fácil estimar la probabilidad de semejante accidente estadístico. Es sumamente pequeña, del mismo orden de magnitud que la probabilidad de formar al azar las 100.000 proteínas «buenas» que se encuentran en los seres vivos, algo así como 10^{-125}. La hipótesis del accidente estadístico conduce a afirmar que la vida sobre la Tierra es un acontecimiento único en el Universo.

2. Una causa física primaria ha favorecido la especie L respecto a la especie D. Es la aplicación del principio de Curie, que encamina a investigar, a partir de la simetría de los efectos, cuál ha podido ser la simetría de las causas. Tratándose de sistemas macroscópicos, esta investigación es legítima y puede ponerse de manifiesto una serie de fenómenos físicos que tienen por efecto favorecer una especie molecular, pero su acción es débil, muy débil. Esta acción, no obstante, ¿es suficiente para producir la quiralidad de los seres vivos?

3. La rotura de simetría, espontánea, se debe a alguna razón que desconocemos (en cierto modo se trata del argumento de Pasteur).

Sólo se tiene en cuenta la segunda hipótesis: ¿puede probarse experimentalmente que existe una rotura de simetría en el plano de

las causas? Para hacer comprender de qué manera una rotura de simetría puede amplificarse, volvamos al ejemplo de los caracoles. Imaginemos esta vez que suben por la pared de un muro orientado hacia el sur y que los caracoles ya no son ni negros ni blancos, sino «izquierdos» y «derechos»: en unos su concha gira a la derecha y en otros, a la izquierda. Los que tienen su concha a la derecha sufren más el calor por la mañana, pero los que la tienen a la izquierda lo sufren más por la tarde y desde el momento en que hace más calor. La mucosidad de estos últimos se seca más. Los caracoles «izquierdos» caen en mayor número que los caracoles «derechos» hasta el momento que ya no quedan más que caracoles D.

Hemos imaginado aquí una disimetría que se debe a la combinación del movimiento aparente del Sol y de los efectos térmicos que distinguen la mañana de la tarde. En el hemisferio sur, el fenómeno tendría el signo contrario y favorecería a los caracoles L.

Un gran número de procesos, cuya importancia se ha reconocido en el laboratorio, pueden intervenir para originar una disimetría:

— la rotación de la Tierra,
— el campo magnético terrestre (a pesar de sus cambios de sentido cada cien mil años aproximadamente),
— el campo magnético inducido por los relámpagos: el campo magnético terrestre, debido al aporte de cargas positivas por parte de la radiación cósmica, posee siempre el mismo sentido y las tormentas primitivas descargaron las nubes hacia el suelo con el mismo sentido de la corriente que hoy día, mientras que los relámpagos iban acompañados por la producción de un campo magnético intenso,
— la rotura de la simetría de la radiactividad beta, que conduce a la producción de rayos X polarizados circularmente.

Se han realizado experiencias de cristalización de tartrato de sodio y amonio en presencia de fósforo radiactivo. El fósforo radiactivo se desintegra emitiendo un electrón positivo y un neutrino para producir azufre:

$$^{32}P \rightarrow {}^{32}S + \text{positrón} + \text{neutrino}$$

La rotura de simetría asociada a la radiactividad beta produce una ligera disimetría en los cristales de tartrato de sodio y amonio, del 0,1 al 0,2 % en favor del isómero levógiro L, lo que hace pensar en una diferencia muy escasa de energía en favor del cristal levógiro L respecto al cristal dextrógiro D (8), siendo la diferencia relativa de energía de 10^{-13}.

— la polimerización, por ejemplo, la formación de una cadena polipeptídica de aminoácidos, se acompaña de una amplificación de una quiralidad inicial incluso débil, sin duda por los efectos de forma de las moléculas que se denomina «impedimento estérico» y que impide que los enlaces se establezcan. La sucesión de procesos de hidrólisis-polimerización, tal como podría producirse en las orillas del océano primitivo, es de una naturaleza que amplifica la quiralidad.

El papel de la rotura de simetría

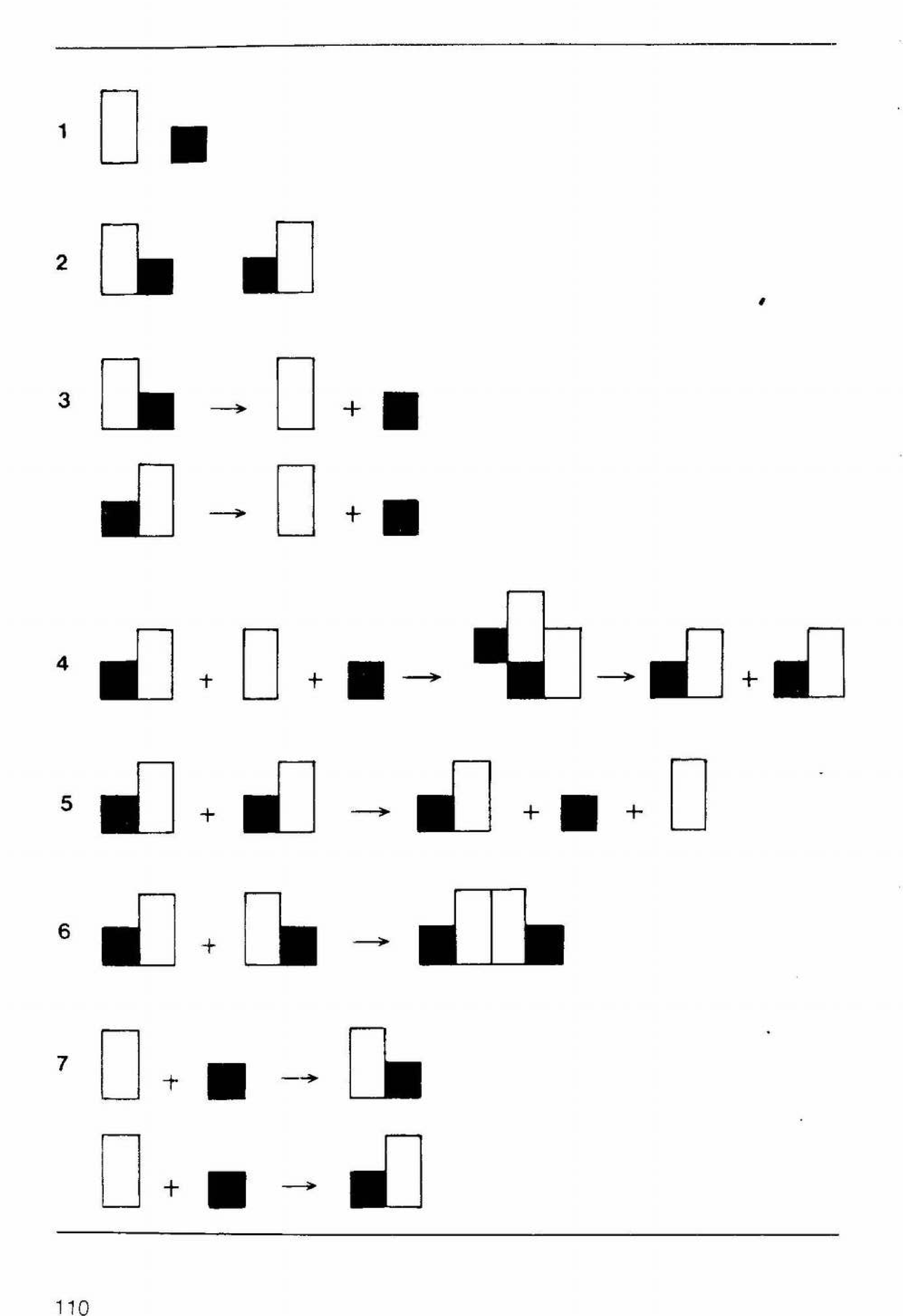
Hemos visto que la energía de enlace de las moléculas L (izquierdas) era ligeramente mayor que la energía de enlace de las moléculas D (derechas). Esta diferencia muy leve puede engendrar una quiralidad completa.

Inspirándonos en un trabajo de Kundepundi y Nelson (1983) (9), vamos a ilustrar el proceso que nos ocupa por medio de una representación gráfica (fig. 14). Para ello simbolizaremos las moléculas que reaccionan mediante figuras geométricas.

Consideremos los rectángulos blancos y los cuadrados negros B y N (1). Éstos se pueden pegar a aquéllos (2) para dar **L** (a la derecha) o **⅃** (a la izquierda), que denominamos D y G. Con D, el pie de la figura está a la derecha, con G, el pie de la figura está a la izquierda (2). Los rectángulos blancos, B, al igual que los cuadrados negros N, son figuras simétricas. Su unión, si se sigue la regla escogida, proporciona figuras disimétricas a la derecha o a la izquierda.

Los D o los G pueden romperse, poniendo en juego un B y un N (3); la presencia de un D (o de un G) puede favorecer la unión de un B y de un N para formar otro D (o G) (4) de lo que resulta una catálisis; el encuentro (colisión) DD, o GG puede poner en juego un B y un N (5); por último, D y G pueden unirse para formar una figura simétrica (6).

La colisión B + N da D (o G) (7); es la base de la producción de figuras (moléculas) disimétricas. La formación en presencia de D (o G) es una catálisis de formación de D (o G) (4); y hay tres procesos de eliminación de figuras disimétricas (3, 5 y 6), por fractura o



por unión de D y G. Las roturas de enlace ponen en juego las figuras de partida, los rectángulos blancos B y los cuadrados negros N, permitiendo así la formación de nuevas moléculas D o G; por el contrario, la unión D + G elimina las figuras disimétricas.

Imaginemos que dominan los procesos de formación (B + N da G o D) y de destrucción espontánea. Se supone en particular que las catálisis y las uniones (D + G) son raras. El sistema se ajusta a un determinado nivel de equilibrio, en el que existen tantas moléculas D como moléculas G.

Supongamos ahora que se deben tener en cuenta las catálisis y las uniones (D + G). Unas y otras favorecen la especie dominante. Esto es lo que vamos a explicar con un breve ejemplo numérico.

Si en un momento dado el número de moléculas G excede el número de moléculas D, la eliminación de (D + G) aumenta el exceso relativo G respecto a D. Por ejemplo, si se tiene:

1.000 G y 990 D (1 % de exceso de G)

la eliminación de 500 (D + G) da:

500 G y 490 D (2 % de exceso de G)

Si el depósito de moléculas B y N es inagotable, pueden formarse nuevas moléculas G o D.

◀ **Fig. 14.** *Esquema de las reacciones químicas que guían las moléculas D y las moléculas L.*

1. Dos especies de moléculas se representan por medio de rectángulos blancos (B) y cuadrados negros (N).
2. Se pueden formar dos tipos de moléculas simétricas ▟ y ▙ (G y D).
3. Las D y las G pueden romperse remitiendo al ciclo a las moléculas B y N.
4. La presencia de un G (o de un D) favorece la reunión de un B y de un N para hacer otro G (u otro D).
5. La colisión D + D o G + G puede remitir al ciclo a un B o a un N.
6. D y G pueden unirse para formar una figura simétrica.
7. La colisión B + N origina D o G.

La rotura de simetría tendrá lugar si la formación de las moléculas G se favorece ligeramente (reacción 7) y la destrucción de las moléculas D se favorece ligeramente (reacciones 3 y 5).

La catálisis:

$$G + B + N \rightarrow 2\ G$$

si es lo bastante frecuente, favorece a su vez la formación de moléculas G, por ejemplo 501 G y 499 D, dando entonces:

1.001 G y 989 D (exceso de 1,2 % de G)

La repetición de estas operaciones produce la amplificación progresiva de la disimetría de forma tal que puede lograrse un régimen estacionario en el que no haya más que moléculas G o moléculas D. El estado final es disimétrico, pero no existe ninguna razón particular para que el estado final sea G o D. La disimetría final (principio de Curie) tiene por origen la disimetría de las causas (en este caso un exceso accidental de las moléculas G).

Imaginemos ahora que la tasa de formación de las moléculas G, en razón de la ventaja energética debida a las interacciones débiles, sea levemente superior a la tasa de formación de las moléculas D.

Si los procesos de formación y de destrucción espontánea dominan, se establece un estado de equilibrio, favorable en muy poco a las moléculas G, pero sólo en la medida en que la tasa de formación de G es un tanto superior a la tasa de formación de las moléculas D.

Si los procesos de catálisis y de unión de las moléculas ganan en importancia, llega un momento en que el exceso de moléculas G, por mínimo que sea, logra ventaja y, en un tiempo muy reducido, se instala una situación estacionaria en la que no existen, en la práctica, más que moléculas G.

Mientras aumenta progresivamente la velocidad de los procesos de catálisis y de reunión, en tanto se hace próximo el punto de bifurcación entre la predominancia de G y la predominancia de D, la «opción» entre una u otra sólo podrá hacerse si las fluctuaciones estadísticas en el número de moléculas que reaccionan son lo bastante pequeñas. Fluctuaciones demasiado importantes proyectarían indiferentemente el sistema del lado de G dominante o de D dominante, ignorando la muy débil diferencia de energía entre las moléculas D y G.

Es posible calcular el umbral de la diferencia de energía por encima de la cual puede engendrarse así el predominio de G. Se encuentra el valor mencionado anteriormente de una milmillonésima

de milmillonésima de electrón-voltio. El hecho de que la diferencia de energía dependa de la carga eléctrica de los núcleos en la potencia 5 sugiere un papel importante de los metales, algunos de los cuales actuarían como catalizador (a través de su presencia en los órgano-metálicos).

La rotura de simetría de la radiactividad beta, de la que hemos hablado, se debe a las propiedades de las *interacciones débiles*. La presencia de estas interacciones tiene por efecto la producción de diferencias muy pequeñas en las energías de enlace de los átomos y de las moléculas. En el caso de los átomos, estas diferencias de energía fueron medidas en el laboratorio por Bouchiat (1082) (10). La diferencia entre las energías de los enlaces de las moléculas levógiras y dextrógiras debida a las interacciones débiles podría ser la causa de la disimetría de las moléculas constituyentes de los seres vivos.

LA EVOLUCIÓN COMO SECUENCIA DE BIFURCACIONES

Examinemos una vez más la explicación de la palabra bifurcación. Acabamos de ver en un ejemplo químico simple cómo se presenta una bifurcación. Bajo la influencia creciente de un cierto tipo de reacción, una mezcla racémica puede bascular de repente hacia un estado constituido completamente por moléculas de una sola especie, D o G; si se ignoran los efectos de las fluctuaciones estadísticas, la transición de la mezcla racémica al sistema puro se efectúa de manera brusca: ha habido una bifurcación y un paso de un régimen estable a otro régimen estable.

Sin duda es más que una metáfora comparar la aparición de nuevas especies vivientes con el fenómeno físico de la bifurcación. Las ramificaciones de especies vivientes, por su enlace de especie a especie, se parecen por cierto al esquema de una estación ferroviaria de distribución. Por mucho que se ignore cómo se produjeron las bifurcaciones entre especies, resulta sugestivo compararlas con las bifurcaciones en los sistemas físicos.

La adición de un cromosoma, un cambio genético, una modificación climática, pueden favorecer el desarrollo de una especie al tiempo que la extinción de otra. Las modificaciones del mensaje genético tal vez no sean de hecho aleatorias, pero el alargamiento de las cadenas de ADN, incluso produciéndose al azar, permite la aparición incesante de nuevas especies fecundas y de otras abocadas

a la extinción. A partir de una especie dada, se abren vías diversas, se originan distintas ramas, ya que ciertas filiaciones se consiguen mejor que otras. No debe deducirse que una sola especie sea fecunda en cada nueva etapa de cada nuevo alargamiento. Muy al contrario. El desarrollo de las especies vivientes se ha hecho posible gracias a que se han seguido vías diferentes.

No obstante, ha intervenido un motor de la evolución, el cambio de las condiciones físicas: cambio de composición química de la atmósfera terrestre (fig. 4), variaciones climáticas, avance y retroceso de las tierras y las aguas que ha forzado a las especies vivientes a salir de su nicho ecológico (11).

Para resumir en breve el mecanismo de la evolución, diremos que la selección darwiniana ha actuado cada vez que se ha producido modificación del nicho ecológico, con lo que ha privilegiado a los más aptos. Se observará sin embargo que, en todas las épocas, la evolución ha hecho aparecer especies que se han convertido en verdaderos fósiles vivientes, ya que parecen vivir hoy día como lo hacían en la época en que se escindieron de la diminuta rama naciente del árbol evolutivo.

La evolución de los sistemas puede dejar tras de sí estructuras estacionarias o abocadas a la desaparición: en este sentido, las estructuras del orden biológico (las especies) no tienen un comportamiento fundamentalmente distinto de las estructuras complejas (por ejemplo con reacciones químicas) que surgen de los sistemas dinámicos que se prestan a ser estudiados en el laboratorio.

Es muy difícil proceder por medio de afirmaciones en un campo en el que los únicos datos disponibles son terrestres. Así, no está probado que, por ejemplo, en ausencia de evolución y de cambio de nicho ecológico, un sistema viviente no alcance una especie de régimen estacionario del que la evolución darwiniana estuviese desterrada.

CONVERGENCIA

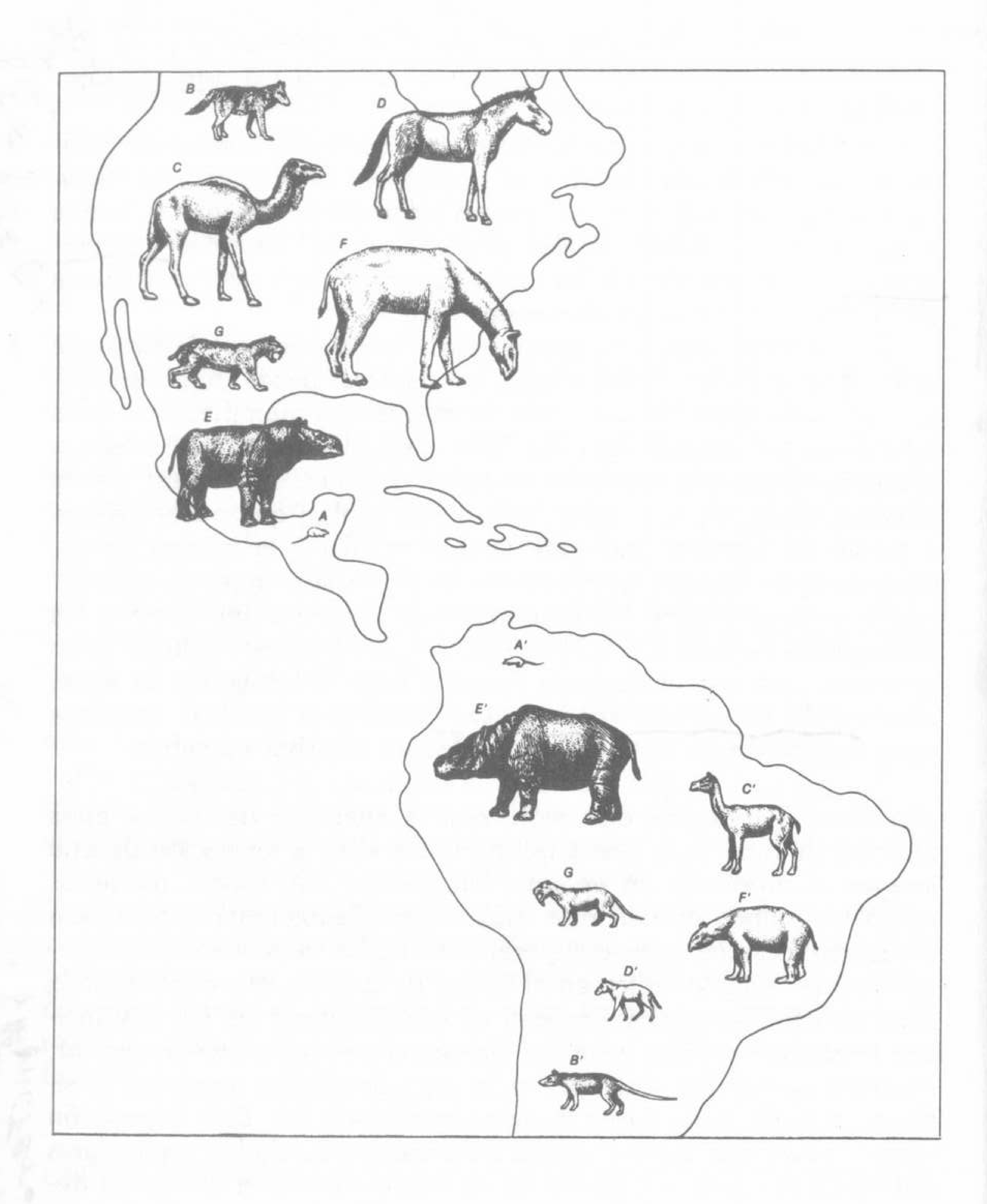
La observación lleva a la teoría moderna de la evolución, según la cual el proceso esencial es aleatorio, si bien éste va acompañado de un fenómeno de selección por supervivencia del más apto. De acuerdo con el «dogma central» de la biología molecular, las mutaciones, duplicaciones, supresiones y reordenaciones aparecen como errores de copia del ADN. Pero, de vez en cuando, estos errores

engendran individuos más competitivos cuya especie suplanta rápidamente a sus predecesores.

De hecho, es digno de constatar, sin que pueda verse con precisión cuál sea la causalidad, que se «encuentran» soluciones técnicas que favorecen la supervivencia a partir de ramas más o menos independientes del árbol evolutivo: es lo que se denomina «convergencia». La evolución de las especies podría ser más determinista de lo que supone la teoría neodarwiniana.

El caso más clásico de convergencia se refiere a los órganos de vuelo que se hallan desarrollados en insectos, peces, reptiles (conservados en ciertos fósiles), aves, marsupiales y mamíferos, a veces de manera en extremo cercana. Otro caso clásico, que se refiere a la rápida adaptación natatoria, se da en mamíferos (delfines), peces (diversos tiburones) y reptiles (ictiosaurios fósiles) que poseen aletas y presentan aproximadamente la misma talla y la misma forma. Otro ejemplo, basado en el estudio de los fósiles, muestra la similitud morfológica entre los mamíferos de América del Norte y los marsupiales de América del Sur (fig. 15), continentes distintos hasta su unión mediante el istmo de Panamá hace dos millones de años, como si la naturaleza «encontrase» soluciones técnicas cercanas para especies muy distintas y alejadas en el árbol evolutivo.

Tal vez resulte más ejemplar la evolución en apariencia independiente del sistema de visión, con la aparición de quince tipos distintos de ojos, pero que implican todos ellos la formación de una imagen al modo de un aparato fotográfico. Así, ciertos moluscos como los pulpos poseen ojos muy desarrollados cuya importancia y cualidad pueden incluso superar a los de los vertebrados. La diferencia más notable radica en el hecho de que en los vertebrados la capa de células nerviosas reposa en el ojo delante de los bastoncillos y conos sensibles a la luz (la retina se denomina *invertida*), mientras que en los cefalópodos la capa de células nerviosas se sitúa en la parte posterior de la capa sensible a la luz. Esta disposición menos «racional» en los vertebrados exige cualidades particulares del tejido nervioso, en particular su transparencia, a fin de no degradar la imagen formada por la luz que la atraviesa. ¿Qué decir entonces de los ojos de las veneras (vieiras) que poseen una óptica refringente y reflejante y una retina invertida? Que se trata de convergencia a partir de situaciones totalmente diferentes, en el caso del ojo, se encuentra confirmado por el estudio del desarrollo del embrión. En los mamíferos, el ojo aparece como una especie de brote que, alcanzando la epidermis, provoca la formación del crista-



lino. En los cefalópodos, por el contrario, el ojo aparece como una especialización de la epidermis que se desarrolla en dirección al cerebro hasta alcanzarlo (12).

La visión es un sistema muy elaborado que desempeña un importante papel en el sistema nervioso humano y en el desarrollo de la inteligencia. La generalización es sugestiva y, a partir del fenóme-

◀**Fig. 15.** Antes de la formación del istmo de Panamá en el Pleistoceno, hace unos dos millones de años, dos series paralelas de mamíferos y de marsupiales terrestres evolucionaron de forma independiente en América del Norte y América del Sur. En consecuencia, determinadas funciones ecológicas fueron desempeñadas por actores filogenéticamente distintos en cada uno de los dos continentes. Por ejemplo, en la figura se identifican con letras diversos mamíferos y marsupiales que siguieron una evolución convergente. Así se encuentra la familia de las musarañas (A) en América del Norte y la familia de los marsupiales cenoléstidos (A') en América del Sur, el lobo de América del Norte (B) y el correpondiente marsupial carnívoro en América del Sur (B'), el camello de América del Norte (C) y el análogo litopterno (C') de América del Sur, el caballo de América del Norte (D) y el análogo litopterno de América del Sur (D'), el rinoceronte de América del Norte (E) y el toxodonto (E') de América del Sur, el chalicotérido (F) de América del Norte y el homalodontorétido (F') de América del Sur, el gato de dientes de sable (G) de América del Norte y su equivalente marsupial (G') de América del Sur. Tras la unión de ambos continentes a mediados del Pleistoceno, se produjeron grandes intercambios de fauna entre ellos y los marsupiales no sobrevivieron (Robert May, «La evolución de los sistemas ecológicos», en *L'Évolution*, bibl. «Pour la Science», Belin).

no de la convergencia, también lo es el afirmar que tal vez existan diversas vías de acceso a la formación de especies inteligentes. Esta hipótesis fue formulada por Sagan y Drake (1975) (13) de la manera siguiente: «Podría haber una especie de ley biológica según la cual existirían diversos caminos que llevasen a la inteligencia y a una alta tecnología: todo planeta habitado, si dispone de tiempo suficiente y si no es destruido, llegaría a un resultado análogo.»

Una ley semejante, es obvio, no está demostrada; se trata todo lo más de una conjetura. Como descansa en el principio de convergencia, conviene volver a los orígenes y presentar las críticas de las que ha sido objeto recientemente.

En estas discusiones se ha evocado con frecuencia la «ley» de Haeckel (1866): «La ontogénesis es el resumen de la filogénesis*.» Por ejemplo, se constata en efecto en el embrión humano, a partir de la concepción, el paso por formas sucesivas que le prestan un asombroso parecido con el embrión de otros animales. El parecido entre los embriones de vertebrados inferiores y de invertebrados fue

* La ontogénesis es la serie de transformaciones sufridas por el individuo desde la fecundación del huevo hasta el ser ya perfecto; la filogénesis es la evolución de las especies.

descubierto por Kovalevski hacia 1860. La publicación del *Origen de las especies*, de Darwin, es de 1859. Con gran rapidez, los parecidos entre embriones de especies diferentes se consideraron como confirmadores de la teoría evolucionista de Darwin.

Pero hoy día es sorprendente referirse a la «ley» de Haeckel. Según Gould (14) hace más de cincuenta años que ha sido refutada: los embriones no reproducen las etapas ancestrales de la evolución.

Ornstein (1982), comparando el desarrollo del embrión en los moluscos y en los vertebrados, llegó a la hipótesis de un antepasado común. El ojo de los moluscos y el ojo de los vertebrados, a pesar de su diferente estructura, derivaría del ojo de este antepasado común. En esta hipótesis no habría convergencia sino expansión por bifurcaciones sucesivas. El empleo de la «ley» de Haeckel hace que la discusión de Ornstein quede viciada desde el comienzo. Claramente, el objetivo de Ornstein es el de rechazar el principio de convergencia a fin de rechazar también el carácter necesario de la evolución hacia la inteligencia. El argumento viene a añadirse a su argumento estadístico en favor de la hipótesis solipsista.

HACIA LA INTELIGENCIA

El carácter, si no necesario, al menos muy probable, de la aparición de la inteligencia destaca con gran nitidez en el estudio de la evolución que realiza André Leroi-Gourhan en *Le Geste et la Parole* (1960) (15). Antes incluso de presentar el análisis de Leroi-Gourhan, resulta útil ofrecer su argumento básico, ya descubierto por Gregorio de Nisa hace 1.600 años en su *Tratado de la creación del hombre* (379): «...Así es como gracias a esta organización que es el espíritu, que éste, al igual que si fuera un músico, produce en nosotros el lenguaje y somos capaces de hablar. Sin duda que jamás poseeríamos este privilegio si, para las necesidades del cuerpo, nuestros labios debieran asegurar la pesada y penosa carga de la alimentación. Las manos son las que han tomado sobre ellas esta carga y han liberado a la boca para el servicio de la palabra.»

¿Puede dudarse de que la palabra sea la clave de la aparición de la inteligencia?

La idea esencial de Leroi-Gourhan es la de tener en cuenta en la evolución el papel de la gravedad combinado con las necesidades de la movilidad para asegurar la supervivencia. Dejando a un lado los animales fijos, como las esponjas o los pólipos, observa Leroi-Gourhan que los demás animales marinos primitivos, que sufren un efecto atenuado de la gravedad en razón del empuje de Arquímedes, son filiformes: tienen la boca en la parte delantera para atrapar la presa y el sistema excretor en la parte posterior; asimismo poseen una cuasisimetría en torno a un plano vertical definido por la flecha de la movilidad y la dirección del campo de gravedad.

El cambio de nicho ecológico hace pasar al animal marino a tierra firme; su adaptación transforma las aletas en patas, mientras que la necesidad de supervivencia hace que nazca una nueva cualidad, la movilidad de la cabeza en el plano vertical. Leroi-Gourhan asigna una enorme importancia al desarrollo de los músculos y de las articulaciones que permitieron levantar la cabeza a los primeros animales terrestres.

La cabeza de los primeros mamíferos posee amplias formaciones óseas ligeras, los senos. El desarrollo de los huesos de la cabeza, del rostro y del cráneo se corresponden con una movilidad cada vez mayor de la cabeza. A medida que transcurre la evolución, disminuye el volumen relativo de los senos, dejando más espacio en el cráneo para el desarrollo del cerebro. La posición vertical termina por reducir el volumen de los senos.

La idea principal de Leroi-Gourhan es la de mostrar que «la ordenación nerviosa sigue a la de la máquina corporal», es decir que el desarrollo del cerebro *no ha producido* la reducción del volumen de los senos, pero *está unido* a dicha reducción. Los cambios de nicho ecológico, en presencia del campo de gravedad, han determinado un aspecto particular de la evolución. La fase última, que se cree es debida a la transición de la selva a la sabana, se caracteriza básicamente por la utilización exclusiva de los miembros posteriores para la marcha, lo que permitió a los miembros anteriores especializarse en la prensión, liberando definitivamente la boca para la palabra.

Sin embargo, la aparición de un órgano de prensión que es terminación de los miembros anteriores no es exclusivo de la rama del árbol evolutivo que conduce a los homínidos. Por ejemplo, «las posibilidades manuales del ratón lavador son lo bastante considerables como para permitirle pruebas que le ponen en competición con ciertos monos». Se ha comprobado que especies de este tipo ya no evolucionan más. Cabe plantear la hipótesis de que «el techo evolutivo se alcanza cuando el volumen cerebral equivale a todo el es-

pacio mecánicamente disponible; las especies entran entonces en su fase de plenitud». La especialización mecánica detiene la evolución: «los paleontólogos hace tiempo que han observado que son los grupos menos especializados los que han dado origen a formas cerebralmente más avanzadas» (pág. 88).

La manifestación de la ley de convergencia se ve con claridad en la presencia de órganos de prensión en las más diversas especies de vertebrados. Sin embargo, no queda demostrado el carácter inevitable del resultado evolutivo final, ya que todavía queda por tener en cuenta la modificación de los nichos ecológicos. ¿Se debe la aparición de los vertebrados terrestres, posteriores a los vertebrados marinos, a la movilidad de los peces o a la retirada de las aguas?

El árbol evolutivo presenta entonces en relación con el hombre, considerado como «objetivo» de la evolución, un conjunto de «éxitos» y de «fracasos». La sola presencia de los «fracasos» basta para que uno quede perplejo ante afirmaciones como las de Sagan y Drake, o T. B. Kuiper (1980): «Un sistema de tratamiento de datos, flexible, eficaz y diversificado, acoplado a medios que puedan actuar sobre el entorno, parece tener un valor tan elevado de supervivencia que la evolución debe conducir inevitablemente a una civilización técnica.» De hecho, si se reflexiona de modo oportuno sobre los fenómenos de bifurcación, en la evolución vista a través del cambio ecológico, puede uno preguntarse si el carácter «inevitable» aquí mencionado no está profundamente unido al cambio de características de los «nichos» ecológicos.

CIVILIZACIONES

La etapa siguiente de nuestra reflexión se refiere a la evolución de las civilizaciones, y la cuestión fundamental será la de saber si esta evolución conduce «inevitablemente» a una civilización técnica avanzada.

Comenzaremos por matizar el sentido de la palabra civilización, para después tratar de rastrear lo que ocurrió en Europa en el momento de la aparición de la ciencia moderna. Esto nos llevará, en el párrafo siguiente, a comparar la situación en Occidente con la situación china, a lo que seguirá una especulación acerca de las condiciones sociales y políticas que propiciaron el nacimiento de una ciencia de la naturaleza.

Es prudente abordar este tema recordando lo que apuntamos

sobre los diferentes niveles de organización de la materia. Resulta indispensable evitar la utilización, en un nivel dado, de las leyes y los conceptos que fueron elaborados en otros niveles. Los riesgos de la confusión, en el mejor de los casos, son los de llegar a conclusiones desprovistas de sentido.

Consideremos, por tanto, las civilizaciones como un producto determinado de la actividad de los grupos humanos.

Parece que la palabra *civilización* se acuñó en Francia en el siglo XVIII para cubrir un conjunto de nociones tales como *policé* (que no tiene que ver con *police* en el sentido moderno del término), es decir, costumbres mejoradas por las instituciones y la cultura; *civilisé o poli*, es decir, cultivado, cortés, lo que implica tanto una cierta maestría tecnológica como una cierta forma de relaciones humanas (16).

No conocemos más que las civilizaciones terrestres. Todas las consideraciones formuladas sobre las civilizaciones extraterrestres (en especial en la ciencia ficción) son, evidentemente, proyecciones de nuestras civilizaciones e imágenes de todas las utopías y distopías de la literatura, con la exageración de tal o cual rasgo determinado, representación, tal vez, de los fantasmas de los autores: los imperios y los reinos galácticos o las guerras de los caballeros, o bien las ciudades armoniosas en las que triunfa la inteligencia, cuando no la belleza y la libertad. Si se quiere reflexionar de modo adecuado sobre algunas de las ideas más corrientes en torno a las civilizaciones extraterrestres, con frecuencia se descubre la hipótesis de que técnicamente son más avanzadas que la nuestra y que poseen, por consiguiente, un poder sobre la naturaleza del que nosotros carecemos.

Esta observación nos lleva a tomar de nuevo una idea de Louis Weber (1929) (17) acerca de la diferencia entre la maestría técnica y la representación del mundo, se considera ésta en el sentido más directo del término —creencias y supersticiones— o, más sutilmente, de un sistema coherente, lógico, de explicación del mundo. Todo ocurre como si el conocimiento de las leyes de la naturaleza, elaborado con lentitud gracias a las técnicas y a su progreso, no influyese más que muy poco a poco en el resto de las concepciones humanas. El hecho de disponer, en un determinado campo, de instrumentos poderosos y eficaces no significa por otra parte que nuestra visión de la naturaleza sea en lo fundamental distinta de la que nos procuran nuestros diferentes sentidos y nuestras diferentes sensibilidades. El instrumento puede ser, claro está, una extensión

de nuestras capacidades físicas, una extensión de nuestros sentidos, sin adquirir por ello la categoría de instrumento de investigación del mundo que nos rodea. Se debe subrayar aquí el interés de la tesis de M. Minsky (18). Yo la resumiría de la manera siguiente: en la medida en que los seres inteligentes deben dominar las restricciones impuestas por las propiedades de la materia en el espacio y en el tiempo, deben elaborar también los medios y hacerse una representación del mundo, que no puede por menos de sernos accesible puesto que se trata de la misma materia en el mismo espacio temporal.

No se conocen ni comprenden con claridad las condiciones del paso del tiempo en los instrumentos de investigación. Tomemos el ejemplo de las leyes de la mecánica. El cañón retumbó por vez primera en la batalla de Crécy en 1346, pero, ¿cuántos años han sido precisos para que se comprenda la trayectoria del proyectil?

En *Death of Nature*, C. Merchant (1982) (19) narra el cambio de actitud de nuestra civilización occidental en relación con la naturaleza que, de madre nutricia amada y respetada, se convirtió en objeto de explotación y de utilización. En dos o tres siglos se realizó la transformación. La demanda social (económica, política) de una mayor eficacia, un rendimiento más elevado, el deseo de los sabios de ser reconocidos y aceptados por el poder político, un número importante de elementos de orden ideológico, económico, social, político e incluso psicológico, son factores que han intervenido. Se produjo un desarrollo tecnológico impresionante en una sociedad que trataba de explicar el mundo por medio del pensamiento de Aristóteles. Independientemente de toda interpretación, la iconografía da testimonio de este cambio, se trate de las minas, la metalurgia, las máquinas de elevar pesos o los artefactos para la guerra, la intervención de los relojes mecánicos y su aplicación social para la división del tiempo, los molinos, los navíos, etc.

Es posible datar esta gran conmoción a partir de la publicación en 1543 de la obra de Copérnico, *De revolutionibus orbium celestium*. Desde Copérnico ya no se trata de tecnología, ni de la representación aristotélica del mundo, sino del descubrimiento de las leyes de la naturaleza. Con Newton y Leibniz, cuya actitud ambivalente frente a la naturaleza, unas veces personalizada y respetada, otras simple objeto de estudio, subraya C. Merchant, se termina la época de transición.

Sin embargo, el desarrollo tecnológico no lo es todo. La sociedad que lo recibe desempeña un papel e interviene en la forma en

que se perciben naturaleza y técnica. La mejor prueba es la existencia de otras sociedades con una civilización compleja y desarrollada en las que, antes del contacto con el mundo occidental, no se produjo movimiento alguno de investigación de las leyes de la naturaleza.

LA CHINA Y OCCIDENTE (20)

Una interesante comparación, y de la mayor importancia para nuestro tema, es la que se plantea entre la sociedad china y la sociedad occidental en los siglos XIII y XIV. El desarrollo técnico de la sociedad china era considerable. La carretilla fue inventada en este país hacia el año 232, sin que llegase a Europa hasta el siglo XIII. El primer documento impreso en chino es un *sutra* budista que data del año 868. La brújula dataría del 1.100 y la pólvora del siglo VIII o del IX. En el siglo I antes de Cristo se explotaban las minas de sal de la provincia de Si-Chuan a través de profundas galerías. En el siglo XI las perforaciones alcanzaban los 1.000 metros de profundidad. En la historia oficial de la dinastía Tang (en torno al 630) se señala la existencia de navíos movidos por dos ruedas de paletas, puestas en movimiento por molinos; había barcos anclados en las riberas y provistos de ruedas de paletas que servían de molinos; la invención de la excéntrica para mover los fuelles de las fraguas se menciona en el año 31 en la historia oficial de la dinastía Han.

Needham (21) multiplica así los ejemplos, destacando en especial cómo se esparcieron por el mundo las innovaciones chinas. Pero la forma en que se elaboraba la representación china del mundo mostraba diferencias considerables en comparación con las de Occidente. El empleo de la tabla de contar y del ábaco hacía que los cálculos efectuados desapareciesen sin dejar huellas, en lugar de quedar por escrito. El álgebra era predominante en la matemática china (desde el siglo IV antes de nuestra era) y poseía un sistema de clasificación de estructuras matemáticas. Pero, debido a que los tipos de ecuaciones guardaban siempre relación con problemas concretos, no se desarrolló ninguna teoría general sobre éstas.

Tal como subraya Needham «la preferencia por un pensamiento en términos de estructura acabó por hacer surgir de la tabla de contar una notación posicional tan completa (dentro de sus propios límites) que convertía en inútiles la mayoría de nuestros signos fundamentales. Desgraciadamente, a pesar de que el resultado fue

magnífico, llevó a una situación a partir de la cual no era posible ningún progreso ulterior».

A estos factores intelectuales se añaden otros factores sociales. Lo sorprendente es que, en toda la historia de China, la importancia esencial de las matemáticas residía en su relación con el calendario. Por razones que enlazan con el antiguo conjunto de creencias cosmológicas, el establecimiento del calendario era una prerrogativa guardada con celo por el emperador, y su aceptación por los Estados tributarios significaba fidelidad a su respecto. Cuando se producían rebeliones o hambres masivas, se llegaba con frecuencia a la conclusión de que algo no funcionaba bien en el calendario y se pedía a los matemáticos que lo rehiciesen.

Por lo general, las matemáticas estaban íntimamente ligadas al sistema de gobierno, así como la agrimensura y el levantamiento de planos, las dimensiones de los graneros, la construcción de diques y canales, el establecimiento de impuestos y tasas de cambio, etc. Estas matemáticas prácticas, difundidas algunos siglos más tarde gracias a la imprenta, suscitaron una eclosión matemática en la época Song (a partir del siglo XII), que, sin embargo, no perduraría. Con la reacción nacionalista de los Ming (siglo XV), las matemáticas se encontraron de nuevo confinadas a las habitaciones más apartadas de las mansiones de los mandarines provinciales.

No obstante, la técnica por un lado y las matemáticas por el otro no bastan para constituir los fundamentos de una ciencia de la naturaleza. Mientras que China era el lugar de contraste entre el saber y la práctica, la innovación de Galileo resultó del enlace entre la práctica de los artesanos y la teoría de los sabios.

Muy bien pudo ocurrir que una combinación de cambios económicos y sociales, la cual sólo tuviese lugar en Europa, hubiese constituido el medio por el que las ciencias de la naturaleza se elevasen al fin por encima del nivel del artesanado superior en que se encontraban los técnicos semimatemáticos.

La contabilidad de los banqueros venecianos parece haber desempeñado una función ejemplar. La reducción de toda calidad a cantidades, la afirmación de una realidad matemática detrás de todas las apariencias, la proclamación de un espacio y de un tiempo uniformes en todo el Universo, ¿no era algo análogo al marco de referencia que con respecto a lo valioso tenía el mercader? No había género, mercancía, joyas o monedas que no pudiesen estimarse o intercambiarse en número, cantidad o medida.

En la sociedad burocrática china nadie hubiese obtenido provecho personal estudiando la mecánica de los navíos, la balística de los cañones, la hidrostática de los canales y de las bombas. En otros términos, el nacimiento de la ciencia requería algo diferente: el interés por la naturaleza, la experimentación dirigida, la industria empírica, la previsión de los eclipses y el cálculo del calendario no bastaba: todo eso lo tenían ya los chinos. Aparentemente sólo una cultura unida a una economía de mercado era capaz de hacer aquello que una civilización agraria y burocrática no permitía.

EL DESPOTISMO ORIENTAL (22)

Es muy arriesgado querer buscar causalidades estrictas en la historia, de modo que las reflexiones que vienen a continuación no son más que especulaciones acerca de los derroteros que puede seguir una civilización. En otros términos, unas contingencias materiales de relieve o de clima pueden influir de manera considerable en la formación de una estructura social y, al igual que la evolución biológica deja tras de sí formas animales inmovilizadas en su adaptación al entorno, cabe imaginar que la evolución social produzca formas inmovilizadas de sociedad, abocadas indefinidamente a una reproducción idéntica, bien porque estén del todo adaptadas al entorno, o incluso destinadas a la extinción, bien porque fuesen incapaces de adaptarse a un cambio de entorno. El significado de esta hipótesis, en relación con el tema del presente libro, está bastante claro. Si se admite que la aparición de la vida es casi inevitable, dadas las condiciones físicas apropiadas; si se admite asimismo que la aparición de la inteligencia es con frecuencia probable al extremo de una descendencia animal, el paso de la técnica al conocimiento de las leyes de la naturaleza, única forma de dominar la alta tecnología, quizá no sea inevitable.

La diferente evolución social y política de Oriente y del área mediterránea ha provocado las reflexiones de historiadores, sociólogos y filósofos. Pero, ¿cómo captar la naturaleza de esta diferencia? ¿Cómo dar una explicación? Las ideas de Wittfogel (1964) tal vez constituyan una especulación muy simplista, pero permiten reflexionar sobre las relaciones de una civilización con sus condiciones materiales.

En ciertas condiciones, el control del agua es la clave de la supervivencia de la población; el control de los ríos y de sus desbordamientos, o la realización de una red de canales que distribuyan

un agua escasa y preciosa, implican la necesidad de una organización a gran escala (China, India, Egipto) que no consigue mantener dicho control más que por medio de multitud de obreros, que en China podía alcanzar hasta el millón de personas. El control del agua, ejercido por un conjunto de funcionarios —verdadera burocracia al servicio del emperador, del rey o del jefe— suponía el dominio de los hombres.

Desde luego que todo el poder no se encontraba en manos del rey o del emperador. La circulación de mercancías no se hubiera realizado sin la presencia de mercaderes. Pero los mercaderes, aun siendo ricos, ¿podían llegar a controlar el gobierno? Parece que esto jamás ha ocurrido en ningún país de civilización hidráulica. Por el contrario, los grandes mercaderes de Venecia funcionaban en un contexto social en el que las instituciones hidráulicas no eran más que marginales.

La sociedad mercantil es competitiva. Incluso hasta cuando se crean monopolios, la competencia subsiste en otro plano. Pero una sociedad hidráulica no puede tolerar organización alguna que no controle. Los dueños de dicha sociedad se aseguran la dirección exclusiva por medio de una burocracia que ellos controlan por completo.

En una sociedad semejante, el papel de las matemáticas es únicamente técnico (un ejemplo de ello es la reconstitución en Egipto, tras las inundaciones, del trazado de los límites de los campos); el papel de los astrónomos se limita al establecimiento del calendario a fin de saber cuándo llegan las lluvias y cuándo hay que utilizar el agua. Aquí todavía hay servidumbre. Cabe suponer, por tanto, como hemos mencionado arriba, que una sociedad tal podría desarrollarse técnicamente sin acceder jamás a la noción ni al conocimiento de las leyes de la naturaleza, es decir, sin acceder a la alta tecnología.

Tal vez bastaría con que un planeta fuese un poco más pobre o un poco más rico en agua (23) que la Tierra para que una vida inteligente se encontrase ante permanentes problemas de supervivencia que absorberían toda su energía y todas sus fuerzas, y que no permitirían acceder a un nivel de saber más complejo, más abstracto y más rico. Desde luego, eso no excluye que una adversidad moderada sea capaz de engendrar, al fin, un apasionado esfuerzo de dominación de la naturaleza. Pero así se plantea una nueva cuestión: ¿qué civilizaciones han podido nacer en los planetas habitables? Y, ya que contemplamos las cosas a escala cósmica, hablemos del millón o del centenar de millones de años: ¿qué ocurre con una civilización al cabo de 100 millones de años? Puesto que el *Homo sapiens* tiene a lo sumo 3 millones de años, ¿cómo especular sobre el porvenir de la humanidad?

LA ACELERACIÓN DE LA EVOLUCIÓN

La aceleración de la evolución (biológica, social) es un fenómeno básico que debe tenerse en cuenta en una discusión sobre la civilización. Al final de esta aceleración aparece necesariamente un cambio importante: catástrofe en las familias animales o, si ello es posible, control de la evolución en las sociedades humanas.

La aceleración de la evolución se manifiesta ya en el nivel biológico. Al mismo tiempo que el mensaje genético se alarga, aumenta el número de especies existentes sobre la Tierra. De hecho, cuanto más largo es el mensaje genético, mayor es la probabilidad de su alteración, lo que incrementa la probabilidad de aparición de nuevas especies, incluidas las especies inadaptadas que desaparecen.

Lo que caracteriza cada nueva especie es la presencia de nuevos órganos o el perfeccionamiento de un órgano que favorece la supervivencia. En el caso de la especie humana, se opina que la invención de nuevos instrumentos ha sustituido a la aparición de nuevos órganos. En particular, esta idea fue formulada por André Leroi-Gourhan (24).

La aceleración de la evolución se manifiesta en el nivel técnico. El «hombre fábrica», el *Homo faber*, no ha cesado de inventar útiles y el número de especies de éstos ha ido en constante aumento (25), como lo indica la tabla siguiente, válida para Europa:

Época (datación)	*Época*	*Número de especies de útiles*
3.000.000	Piedras adaptadas	25
600.000	Achelense	70
100.000	Paleolítico medio	100
40.000	Paleolítico superior	100
10.000	Mesolítico	200
5.000	Neolítico	350
1.500		

Indudablemente existe un efecto de retroalimentación. El perfeccionamiento de las herramientas aumenta las posibilidades de supervivencia y, desde luego, la esperanza de vida, lo que a su vez crea condiciones favorables para refinar las herramientas.

El fenómeno de multiplicación de las especies de útiles ha continuado manifestándose; su última vicisitud es la explosión informática y la extraordinaria floración de material de paso con fines específicos, especializados y que difieren tanto entre sí como un cuchillo de una punta de flecha de sílex.

La aceleración de la evolución se produce asimismo en el nivel demográfico. Se observa que el crecimiento demográfico de la especie humana presenta una marcada diferencia respecto al crecimiento numérico de otras especies animales. Para éstas, el crecimiento depende, por un lado, de los recursos y, por otro, de los predadores. Incluso en ausencia de predadores, la oscilación de la población va asociada con las variaciones de recursos y con el desfase que se produce en el tiempo entre la multiplicación de la especie y la desaparición de los recursos. En el caso de la especie humana, el crecimiento demográfico está ligado a la invención de nuevas herramientas, con el consiguiente aumento de los recursos, ya se trate de herramientas para la caza, para la pesca, para la deforestación o para el cultivo, del empleo de abonos o de la selección de semillas, sin hablar de los efectos recientes relacionados con el desarrollo científico.

Crecimiento Demográfico

Se observará en particular que, en el caso de la especie humana, el cambio de nicho ecológico es producto de la propia actividad del hombre.

Hay algo en la naturaleza de la evolución que parece específico de los seres vivos y que tal vez sea el motor de esta aceleración del crecimiento. Este fenómeno fue descubierto por Cailleux (26) en el examen del comportamiento humano, cuyo aspecto más sorprendente es el crecimiento demográfico, caracterizado por una tasa anual creciente. Ésta, que era del 0,056 % hasta el siglo XVI, sube al 0,27 % en el XVII y alcanza el 2 % en 1972. Para establecer su relación con la multiplicación de las especies, conviene recordar la analogía entre la invención de nuevas herramientas y la aparición de nuevos órganos. La multiplicación de las diferentes clases de herramientas y la especialización que la acompaña pueden describirse como un crecimiento del número de especies de homínidos.

Uno de los fenómenos más interesantes es el del cambio tecnológico. Una nueva invención tecnológica que permita mejores prestaciones se difunde con rapidez; la antigua tecnología, al tener la misma finalidad, es regresiva e incluso llega a desaparecer por completo. Las herramientas de bronce y de hierro eclipsaron la producción de los instrumentos de piedra tallada. ¿Quién sabe utilizar una rueca en el mundo moderno? Y sin embargo, si ya no se hila, sí se utilizan todavía los hilos industriales para tricotar. Los ejemplos son innumerables, pero su análisis hace intervenir elementos distintos de los tecnológicos, desde el momento en que se trata de oficios artísticos que favorecen la supervivencia de técnicas arcaicas.

El relevo permite nuevas prestaciones y el crecimiento de las prestaciones se realiza según una tasa creciente. Podría tomarse el ejemplo del rendimiento de las máquinas que producen energía a partir de una transformación de naturaleza química: madera, carbón, petróleo, propergoles y, con la ampliación a la química nuclear, el uranio. ¿Es posible prever las fuentes de energía y su rendimiento en el mañana?

Para que se comprenda la rapidez con que se produce el crecimiento de la población mundial, a razón del 2 % de media por año, basta con señalar que, tomando una pareja como punto de partida (¿y por qué no Adán y Eva?), se requieren sólo 1.077 años para alcanzar una población de 4.500 millones de habitantes. Pero todavía más destacable que esta progresión geométrica es el aumento de la tasa de crecimiento. De hecho, la fórmula matemática que mejor representaba el crecimiento en el transcurso de los tres últimos siglos preveía, en 1974, una población *infinita* en nuestro planeta para el año 2030. Resultaba evidente que antes de esta fecha tenía que producirse «algo». En los comienzos del siglo XXI, si es que ninguna catástrofe viene a poner fin a nuestra civilización o a toda la vida sobre la Tierra, deberá afrontarse el problema del control global de la actividad humana en toda la Tierra: control de población, de materias primas, de la producción agrícola, de los recursos energéticos, de la generación de energía y de la contaminación. ¿Habrá espacio para la libertad? Tal vez la reducción de la población del globo, la *adecuada* interiorización de las necesidades globales de la humanidad, la elevación del nivel de vida y de la cultura, la difusión del saber, todo ello cambiará por completo el papel de la alta tecnología.

No

La finalidad de las observaciones precedentes, que insisten en subrayar lo extraordinario de los problemas del próximo siglo, se propone simplemente mostrar que los objetivos actuales de nuestra civilización no podrán permanecer inalterables y deberán cam-

biar de forma radical. Es difícil imaginar que una civilización, sea cual sea, mantenga los mismos objetivos durante millones de años, aunque seamos incapaces de sospechar en qué van a consistir los nuevos objetivos. Y, sin embargo, las condiciones físicas sobre el nicho ecológico «Tierra», tal como permite prever la astrofísica, cambiarán muy poco durante los cuatro o cinco mil millones de años venideros. El futuro es nuestro. Pero, ¿qué futuro? Volveremos sobre esta cuestión en la cuarta parte de esta obra.

LA FÓRMULA DE DRAKE

Ya presentamos en la introducción la fórmula de Drake, astrofísico de Cornell (EE.UU.), la cual, en nuestra Galaxia, da el número de estrellas que acompañan a un planeta habitado por seres que hayan creado una civilización. Sin duda se trata más de una especulación que de una estimación.

Ahora, hemos reunido los datos necesarios —datos astrofísicos o especulaciones sobre el fenómeno de la vida— para concretar la fórmula de Drake. Trataremos de ser tan rigurosos como sea posible. Observaremos que el resultado es muy incierto pero que, sin embargo, permite algunos razonamientos que serán objeto de la cuarta parte del libro.

Recordemos que la idea esencial es la estimación de qué fracción del número total de estrellas en la Galaxia va acompañada de un planeta portador de una civilización, al tiempo que se identifican uno a uno los diferentes factores que intervienen. Recordemos la fórmula dada en la página 12:

$$C = E \times f_p \times f_B \times f_M \times f_d \times f_V \times f_l \times f_C \times t_C$$

—E, número de estrellas por año.

Puede estimarse el número E de estrellas que nace cada año en la Galaxia en aproximadamente 20:

$$E = 20$$

No hay mucha incertidumbre acerca de este número. El número E varía muy poco a poco y no fue muy distinto hace cinco mil millones de años.

— f_p, frecuencia de los sistemas planetarios. Las recientes observaciones realizadas con el satélite infrarrojo IRAS han permitido evidenciar en infrarrojos discos nebulares, con probabilidad ricos en cenizas. Los discos descubiertos en la actualidad (Vega, T Tauri) poseen un diámetro mucho mayor que el disco protoplanetario que debió de existir en torno al Sol. Esto nos confirma tan sólo en la idea de una elevada frecuencia de discos protoplanetarios alrededor de las estrellas jóvenes.

Una estrella de cada dos pertenece a un sistema doble. Cabe suponer que todas las estrellas aisladas están acompañadas de un cortejo de planetas, lo que conduce a la probabilidad f_p de los sistemas planetarios:

$$f_p = 1/2$$

— f_B, probabilidad de estrellas «adecuadas». Hemos visto respecto a los problemas de las catástrofes térmicas y glaciares, en relación con la duración necesaria del mantenimiento del agua líquida en la superficie de un planeta, que aproximadamente una estrella de cada cien se encuentra en el intervalo adecuado de masa, es decir:

$$f_B = 0{,}01$$

— f_M, probabilidad de una «adecuada» masa planetaria. Esta magnitud es mucho más incierta, en ausencia de datos sobre la masa y la dimensión de los discos protoplanetarios. Una hipótesis *optimista* consiste en admitir que todos los sistemas planetarios son más o menos análogos al nuestro. Si comparamos Venus, la Tierra y Marte en el intervalo favorable de masa, de 0,9 a 1,5 de masa terrestre, podemos estimar la probabilidad f_M de las masas «adecuadas» en 1/3. Una hipótesis *pesimista* consiste en admitir un amplio abanico de distribución de las masas y de los tamaños de discos protoplanetarios, en cuyo caso la probabilidad f_M tal vez sea mucho menor. Vamos a retener, no obstante, como base de nuestra discusión:

$$f_M = 1/3$$

— f_d, probabilidad de una «adecuada» distancia a la estrella central. Esta distancia debe estar comprendida en un pequeño in-

tervalo, lo que quizá represente, por analogía con el sistema solar, un caso favorable sobre 25. Tenemos, pues:

$$f_d = 0{,}04$$

—f_V, probabilidad de aparición efectiva de la vida en un planeta que presente condiciones favorables. Supondremos que, cuando las condiciones son favorables, la vida aparece siempre, es decir:

$$f_V = 1$$

— f_I, probabilidad de aparición de la inteligencia a partir de la vida. El fenómeno evolutivo de convergencia lleva a suponer que la inteligencia aparece siempre, y que:

$$f_I = 1$$

— f_C, probabilidad de aparición de una civilización tecnológica avanzada. ¿Conduce siempre la vida inteligente a la investigación científica, al descubrimiento de las leyes de la naturaleza y a la alta tecnología? El examen de civilizaciones terrestres, las del trigo, maíz y arroz, no permite apenas suponer que haya más de una oportunidad sobre tres, es decir:

$$f_C = 1/3$$

No nos queda más que realizar la operación que da el número p de planetas formados cada año y susceptibles de acoger una civilización tecnológica avanzada,

$$p = E \times f_p \times f_B \times f_M \times f_d \times f_V \times f_I \times f_C$$

En la hipótesis optimista se obtiene:

$$p = 0{,}0005$$

En este momento la sede de una civilización semejante la constituyen aquellas que se encuentran en el intervalo de tiempo t_c de la duración de esta civilización. Se halla entonces un número total de planetas portadores de una civilización tecnológica avanzada:

$$C = p\ t_c$$

En cierta manera la duración de una civilización es una cantidad arbitraria: el *Homo sapiens* existe desde hace 400.000 años ¿Durará la civilización tecnológica todavía ese tiempo o se autodestruirá de aquí a 100 años?

Tomando como valores extremos 10.000 años y 100.000.000 de años, se obtiene, para el número de civilizaciones de alta tecnología, el intervalo siguiente:

$$5 < C < 50.000$$

A razón de 2 estrellas por 1.000 años-luz —cúbicos en la Galaxia—, se puede evaluar la distancia media de la civilización más cercana. En razón de la forma en disco (fig. 20) de la Galaxia, es preciso mirar la *superficie* del disco ocupado, si C es pequeño, o un *volumen* tomado en el espesor del disco, si C es grande. Se calcula entonces,

$$180 < d < 13.000 \text{ años-luz}$$

LOS RIESGOS DEL VIAJE EN LA GALAXIA

Esta estimación supone que el viaje del sistema solar en la Galaxia se ha producido sin daños durante cuatro o cinco mil millones de años. ¿Cuáles son, no obstante, los extraños y peligrosos encuentros con que puede toparse el sistema solar?

Los conocemos de dos tipos, uno seguro y el otro probable.

La extinción masiva de especies vivientes parece producirse de manera casi periódica a lo largo de los últimos 250 millones de años, con una periodicidad de unos 30 millones de años. La causa de extinción parece ser la caída sobre la Tierra de meteoritos de grandes dimensiones (27). La caída va acompañada de la producción de una inmensa cantidad de cenizas y de una modificación climatológica transitoria pero importante, un sensible enfriamiento de la superficie terrestre. La prueba de la caída de estos meteoritos, probablemente núcleos de cometas, se encuentra en los grandes cráteres meteóricos fósiles —cuya formación parece estar relacionada con la misma época— así como en los depósitos de materia rica

en iridio, depósitos debidos a la lenta caída de las cenizas generadas por el impacto. Tales anomalías geoquímicas, establecidas en puntos muy alejados entre sí en la superficie de la Tierra, se han relacionado con la desaparición de los dinosaurios (hace 66 millones de años) y de especies vivientes al final del Eoceno (hace 37 millones de años).

El origen de estos fenómenos hay que buscarlo a escala galáctica, para lo cual es preciso evocar el mecanismo de inyección de nuevos cometas en el sistema solar. El Sol, en su recorrido a través de la Galaxia, arrastra no sólo a los planetas sino también a una nube de pequeños cuerpos protocometarios. De manera permanente, las fluctuaciones gravitatorias debidas a la acción de las estrellas próximas precipitan de tanto en tanto a uno de estos pequeños cuerpos hacia el Sol, que entonces se encuentra dotado de un nuevo cometa. A veces, y parece que de modo casi periódico, un gran número de núcleos cometarios es proyectado hacia el Sol, y alguno de ellos puede llegar a golpear sobre la Tierra.

Este diluvio de núcleos cometarios se atribuyó al paso del Sol a través del plano galáctico. Efectivamente, en su movimiento (figura 16) el Sol sube y baja respecto a dicho plano, siguiendo un período de unos 60 millones de años. Atraviesa, pues, el plano galáctico cada 30 millones de años. Pero esta explicación es poco convincente, ya que las acciones gravitatorias sobre la nube protocometaria, en el viaje a través del plano galáctico, no son apenas superiores a los 100 parsecs del plano. Por contraposición, las explosiones de las supernovas, si su distancia es inferior a los 50 años-luz, son capaces de proyectar núcleos cometarios hacia el Sol. El mecanismo es el siguiente: cuando se produce una explosión, se produce una gran cantidad de radiación energética elevada. Esta radiación, al golpear un núcleo cometario, ocasiona una proyección a gran velocidad de los átomos y electrones arrancados a la superficie irradiada. Por un efecto de acción y reacción, análogo al que tiene lugar en un reactor estático, el núcleo cometario es proyecta-

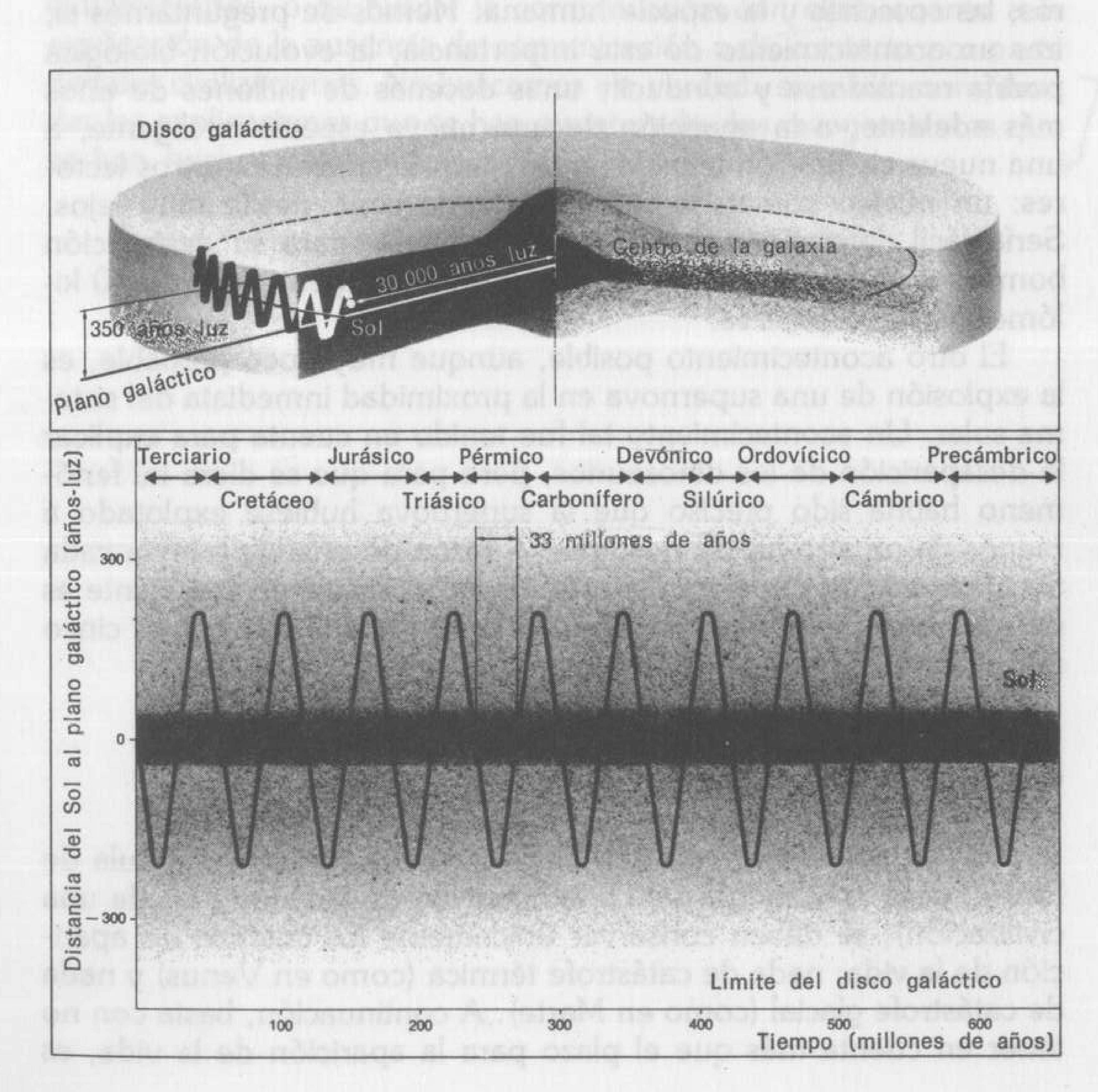


Fig. 16. *Movimiento del Sol en la Galaxia.* El Sol no permanece inmóvil en la Galaxia y su movimiento a través de ella, según Rampino y Stothers, sería capaz de provocar una extinción periódica de las especies vivientes. Nuestra Galaxia tiene aproximadamente la forma de un disco en el que las estrellas y la materia interestelar están concentradas a lo largo del plano de la mediana, plano galáctico (A). Pero, en cuanto a las estrellas, esta distribución no es más que un promedio, ya que cada una de ellas esta animada por una velocidad aleatoria en el interior de la Galaxia, ligada a las condiciones iniciales de su formación. Así, el Sol en su movimiento en torno al centro galáctico oscila también de una parte a otra del plano galáctico, con un período que depende de la densidad local de materia en el disco (A). La observación de las estrellas cercanas ha permitido la determinación de un período de oscilación de alrededor de 66 millones de años, es decir, un recorrido del plano galáctico cada 33 millones de años. La coincidencia entre este período, la extinción de las especies vivientes y la formación de grandes cráteres meteóricos posibles se debería al recorrido del plano galáctico y a la interacción del Sol y de su cortejo de planetas y cometas con las numerosas nubes interestelares del plano galáctico, ya fuese por la desestabilización de las órbitas cometarias y de su llegada a las proximidades del Sol, ya por el efecto de pantalla en el sistema solar, con efecto devastador de cualquiera de ellos sobre la Tierra.

do en el sentido de la radiación. Una supernova que explotase demasiado lejos no produciría efecto porque no calentaría lo bastante el núcleo cometario para producir un fenómeno de acción-reacción suficiente. Una supernova que explotase demasiado cerca proyectaría los núcleos cometarios en todas las direcciones. Como se trata de un fenómeno aleatorio, no se puede esperar que se dé periodicidad, sino tan sólo una recurrencia casi regular.

Evidentemente, es muy difícil decir cuál habría sido la evolución de los seres organizados si las modificaciones del nicho ecológico *Tierra*, como consecuencia de la caída de un diluvio de meteoritos (que destruyó en el Cretáceo el 70% de toda la fauna), no hubiesen tenido lugar. También cabe interrogarse acerca del efecto que podría tener un invierno cósmico sobre la vida de los grandes mamíferos, las cosechas y la especie humana. Hemos de preguntarnos si, tras un acontecimiento de esta importancia, la evolución biológica podría reanudarse y conducir, unas decenas de millones de años más adelante, a la aparición de una nueva especie inteligente, a una nueva civilización tecnológica. Tranquilicemos a nuestros lectores: un núcleo cometario nuevo se vería venir desde muy lejos. Sería fácil determinar su trayectoria y enviar para su destrucción bombas termonucleares capaces de fragmentar pedruscos de 10 kilómetros de diámetros.

El otro acontecimiento posible, aunque muy poco probable, es la explosión de una supernova en la proximidad inmediata del sistema solar. Un acontecimiento tal fue tenido en cuenta para explicar la desaparición de los dinosaurios, pero para que se diera tal fenómeno habría sido preciso que la supernova hubiese explotado a menos de un año-luz de nosotros. A razón de una supernova cada 50 años, *en toda nuestra Galaxia*, un acontecimiento semejante es de una rareza extrema: menos de una posibilidad por mil en cinco mil millones de años.

CONCLUSIÓN

Dos palabras para concluir. Si se vuelve a tomar la fórmula de Drake, pero aplicándola sólo a la aparición de la vida (y no de una civilización), se deben conservar únicamente los criterios de aparición de la vida: nada de catástrofe térmica (como en Venus) y nada de catástrofe glacial (como en Marte). A continuación, basta con no tener en cuenta más que el plazo para la aparición de la vida, es

decir dos mil millones de años. Se pueden ignorar también los problemas relativos al desarrollo de la inteligencia y al acceso a una tecnología avanzada. Por último, al admitir una duración para la existencia de una vida primitiva de mil millones de años, llega a estimarse el número de planetas en los que la vida está presente en 6.000.000, lo que coloca al planeta más cercano con organismos vivientes a 15 años-luz de nosotros, es decir en el extrarradio. Recordemos que si se tienen en cuenta otras restricciones de carácter obligatorio —pero estadístico— del fenómeno de convergencia, la hipótesis optimista coloca la civilización más cercana, con una duración de un millón de años, a 6.000 años-luz.

¿Es posible el contacto? La cuestión de la que nos vamos a ocupar se refiere no tanto a los intentos activos de dar con civilizaciones extraterrestres, o de buscar la comunicación con ellas, cuanto a la explicación de la ausencia de comunicación o de contacto por parte de tales civilizaciones. No buscamos «la verdad» sino sólo comprender las explicaciones que se han aventurado, los razonamientos que se han hecho, esperando que un día...

IV. ¿DÓNDE ESTÁN?* O ¿A CADA UNO SU VERDAD?**

«Y no es porque las pruebas que buscáis no existan...»
«Este acto... tiene el valor que cada uno quiera atribuirle.»

Cada uno su verdad, acto II

RESUMEN E INTRODUCCIÓN

En la primera parte hemos ofrecido una *información* selectiva que ayuda a comprender, desde el punto de vista astrofísico, la naturaleza del problema de la inteligencia extraterrestre. Se han presentado dos aspectos muy distintos:

— *Por una parte,* la universalidad de las leyes de la naturaleza. Verificado en los campos de la física y de la química, el principio de la universalidad de las leyes de la naturaleza permite, por extrapolación, afirmar que si la aparición de la vida ha sido posible sobre la Tierra, también lo ha sido en otros lugares. El principio de convergencia, que después de todo no es más que una formulación particular de este principio de universalidad, autoriza una extrapolación más audaz, aquella que afirma que la aparición de la inteligencia es inevitable.

No todo el mundo admite estas extrapolaciones, puesto que, por complejas que sean las moléculas orgánicas halladas en los meteoritos o detectadas en el medio interestelar, no son todavía organismos vivientes.

---

* Pregunta atribuida a Fermi (1942).
** Pirandello (1917).

— *Por otra parte*, una descripción del Cosmos y de sus propiedades: objetos que lo constituyen, estrellas, galaxias, planetas, composición química de los astros, origen de los elementos, evolución estelar.

La formación continua de estrellas en la Galaxia ilustra, en el campo astrofísico, el principio de universalidad de las leyes de la naturaleza; ahora bien, la formación de estrellas lógicamente implica la formación de planetas. No obstante, no sabemos cómo se ha formado el sistema solar. Desde hace cuarenta años las teorías cosmogónicas han realizado progresos muy notables, pero la única constatación que indica la validez de las teorías se encuentra en el reciente descubrimiento, por medio de la observación con infrarrojos del satélite IRAS, de la existencia en torno a ciertas estrellas de amplios y tenues discos de gas y cenizas que guardan un extraño parecido con el disco protoplanetario de la teoría.

La aplicación del principio de la universalidad de las leyes de la naturaleza a la formación de los sistemas planetarios induce a afirmar que la Galaxia contiene miles de millones de sistemas planetarios más o menos análogos al nuestro. En otros términos, la existencia de un sistema planetario, el nuestro, induce, por un lado, a afirmar que la formación de un sistema planetario es posible, y por otro, a establecer la hipótesis de que la formación de tales sistemas es la norma.

En la segunda parte hemos examinado el paso de la materia abiótica a la vida, a la inteligencia, a la civilización. En relación con el origen de la vida hay dos escuelas enfrentadas: según una de ellas, la aparición de la vida, dándose las condiciones favorables, es inevitable; según la otra, la aparición de la vida es un fenómeno muy poco probable, así la especie humana podría ser la única forma de inteligencia en el Universo.

Convenía analizar las tesis sostenidas por ambas escuelas y, especialmente, mostrar de qué forma los defensores del principio de la universalidad de las leyes de la naturaleza y de su aplicación al problema de los orígenes de la vida refutan los argumentos de los «solipsistas», para quienes el hombre está solo en el Universo. Los solipsistas también utilizan el principio de la universalidad de las leyes de la naturaleza pero, a mi parecer, de una manera bastante sesgada.

No hay nada probado en este campo, pero se observará, sin embargo, que los defensores de la pluralidad de los mundos habita-

dos utilizan los argumentos científicos clásicos. Por medio de experiencias de laboratorio tratan de hallar cómo pudo surgir la vida, y construyen poco a poco un modelo creíble de su origen, aun cuando tal modelo está todavía sin acabar.

El fenómeno de convergencia por el que el ser viviente, siguiendo vías evolutivas diversas, produce órganos que aseguran las mismas funciones (las alas y el vuelo, el ojo y la visión, por ejemplo), puede también ser extrapolado para afirmar que la aparición de la inteligencia y de la alta tecnología tuvieron lugar de modo necesario. Esta afirmación descansa sobre un hecho demostrado, el solo ejemplo de la Tierra, sobre un principio que jamás ha estado en contra de la universalidad de las leyes de la naturaleza —ampliado al fenómeno de convergencia que se asimila a una ley universal— y, finalmente, sobre un tema ideológico, el tema del progreso que parece remontarse a Spencer (1852) e inspiró el «darwinismo social», precursor de la sociobiología.

La búsqueda de inteligencias extraterrestres (el programa conocido con el nombre de SETI, de sus siglas en inglés: Search for ExtraTerrestrial Intelligence) no ha producido resultados; no existe evidencia alguna de un desembarco*, antiguo o moderno, de cosmonautas venidos de alguna parte. Siguiendo la bella fórmula de Sagan: si «la ausencia de prueba no es la prueba de la ausencia», la ausencia de «contactos en la tercera fase» merece tomarse en consideración. Significa, al menos, que la más cercana de las civilizaciones extraterrestres, o está situada muy lejos, o tiene mucha dificultad para llegar hasta nosotros, o sencillamente no existe. También puede uno imaginarse que las civilizaciones extraterrestres han superado hace mucho tiempo la etapa de las conquistas y de la exploración galáctica, o que no sienten interés por nosotros, o que no tratan de manifestarse. Pero resulta difícil imaginarse que tales comportamientos sean la regla. Para establecer al menos algunas de estas afirmaciones, se han llevado a cabo complejos razonamientos. La polémica desencadenada proporcionó argumentos que muestran las debilidades, si no el carácter absurdo, de las hipótesis que se hallan en la base de tales razonamientos.

De hecho, todo autor de una teoría, sea optimista (o podría afirmarse: poliantropomorfa) o solipsista, parece que formula su con-

* Los ufólogos por supuesto que no estarán de acuerdo con esta afirmación.

vicción íntima, o acaso su creencia. Cada escuela tiene su jefe de fila y éstos no se ponen de acuerdo entre ellos. A fin de cuentas, podemos afirmar que *a cada uno su verdad.*

A LA BÚSQUEDA DE SEÑALES

La búsqueda de las civilizaciones extraterrestres descansa en el rastreo de señales procedentes de otros planetas.

Las señales pueden ser de radio (es la hipótesis más corrientemente admitida) u ópticas. Pero, para tratar de imaginar la forma bajo la que una civilización extraterrestre podría manifestarse, no podemos partir más que de la experiencia terrestre. ¿Qué señales emitiríamos si *quisiéramos* comunicarnos (esperando *poder* hacerlo) con una civilización extraterrestre? A falta de una comunicación planificada y organizada, podemos pensar que nuestro planeta, que deja escapar radiaciones (luminosidad de las grandes aglomeraciones, radiación de la radio y de la televisión, etc.), es visible a gran distancia. A la inversa, podemos imaginar que una CET (Civilización ExtraTerrestre) deja escapar radiación que nosotros seríamos capaces de descifrar.

Debemos, pues, examinar, en función de la situación y de las posibilidades presentes y futuras, lo que podría ser la detección de una CET. Toda la discusión descansa sobre las propiedades y la propagación de los haces luminosos y electromagnéticos.

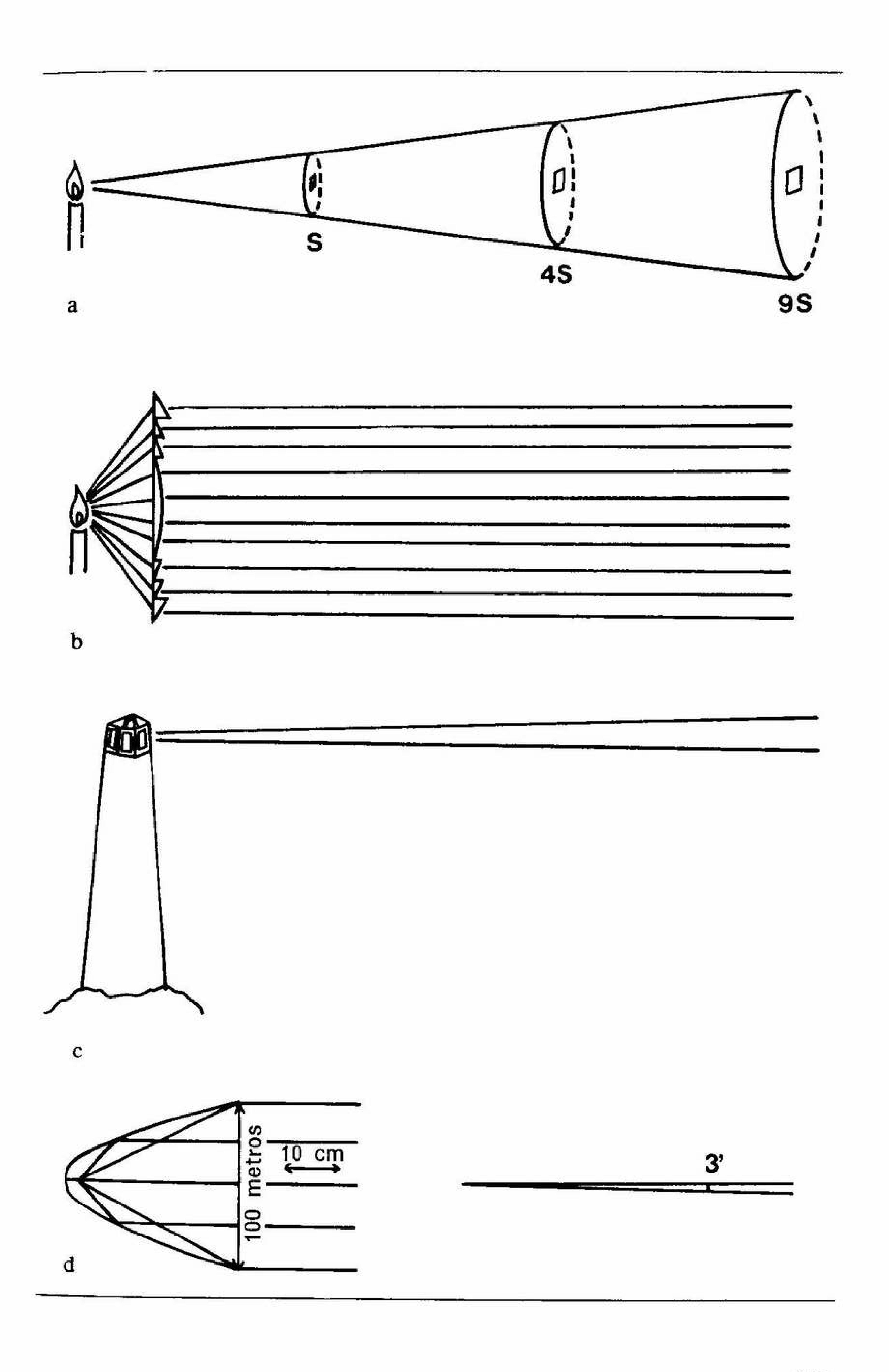


Fig. 17. *Propagación de la radiación.* En (a) un haz cónico establecido ▶ sobre la luz emitida por una bujía en todas las direcciones divide en planos sucesivos situados a distancias *d*, 2*d*, 3*d*, las superficies S, 4S, 9S..., proporcionales al cuadrado de la distancia. La conservación del flujo luminoso implica que la iluminación (flujo de luz por unidad de superficie) decrece en razón inversa al cuadrado de la distancia.

En (b) se observa cómo una lente de Fresnel, semejante a la que se utiliza en los faros (c), permite concentrar el haz. Sin embargo, las propiedades ondulatorias de la radiación limitan los resultados. Un reflector parabólico de 100 metros de diámetro (d) que envíe desde su foco ondas de radio de 10 centímetros de longitud de onda produce un haz de radiación de 3 minutos de arco de abertura.

Propagación de las radiaciones

Consideremos una fuente de pequeño tamaño que emita en todas las direcciones, ya se trate de la llama de una vela, ya del filamento de una bombilla eléctrica. Si se diseña un cono cuya cima esté colocada en la fuente (casi un punto) y si en el camino no se produce ninguna absorción de la radiación, la cantidad de luz será la misma en todas las partes del cono. Sin embargo, si se efectúan secciones en el tubo a distancias cada vez superiores, la superficie dividida aumenta según el cuadrado de la distancia. La cantidad de luz recibida por unidad de superficie decrece en razón inversa al cuadrado de la distancia.

Esta propiedad sigue siendo cierta cualquiera que sea el modo de producirse la radiación. Con todo, es posible reunir la luz emitida por una fuente cualquiera mediante el uso de un espejo o una lente. En los faros se utiliza una lente compuesta hecha de una lente central y de anillos de lentes (lente de Fresnel). La abertura del haz hace intervenir a la vez las dimensiones de la fuente y las imperfecciones del sistema óptico. El resultado es un pequeño haz luminoso de algunos grados de abertura. Vamos a dar algunas cifras para ilustrar cuánto se gana en intensidad. Un haz de 45° de abertura contiene el 15% de la luz de una fuente que emita en todas las direcciones. Recogida por un sistema de lentes de 1/2° de abertura, la intensidad del haz se multiplica por 42.000 y es equivalente entonces a la de una fuente que emitiese en todas las direcciones y que fuese 6.000 veces más potente.

Si la abertura del haz es de 1/2 minuto de arco, se gana todavía un factor 36.000 y la intensidad del haz es equivalente a la de una fuente que emitiese en todas las direcciones y que fuese 22 millones de veces más potente.

No se puede ignorar en esta discusión que las propiedades ondulatorias de la luz limitan la posibilidad de concentrar un haz. Con un sistema óptico de diámetro D que actúe sobre un punto de origen de longitud de onda 1, la abertura del haz (en grados) es, por lo menos, del orden de 57 (1/D). Por ejemplo, con un espejo parabólico de 100 metros de diámetro y una longitud de onda de 10 centímetros es posible obtener un pequeño haz de ondas de radio de 3 minutos de arco de abertura. En el caso de la figura (figura 17), la ganancia en intensidad es de 600.000.

Puede admitirse que nuestros destinatarios son incapaces de detectar nada por debajo de cierto umbral. Esto fija la intensidad del haz detectable, por lo tanto, una relación entre la potencia de la fuente, la abertura del haz y la distancia.

Si *d* es la distancia que puede alcanzarse para una potencia dada con una fuente que emite en todas las direcciones, el empleo de un espejo en las condiciones descritas (100 metros de radio, 10 centímetros de longitud de onda) permite alcanzar la distancia de 800 *d*.

Recíprocamente, nada nos impide imaginar que una civilización extraterrestre que haya percibido nuestra existencia nos envía señales de radio. Esta CET debería disponer de una tecnología avanzada que le permitiese orientar con gran precisión un espejo de grandes dimensiones en nuestra dirección. En esta hipótesis, bastaría con ponerse a la escucha del cielo y descifrar las señales recibidas. Un mensaje codificado, de amplitud suficiente, sin lugar a dudas sería distinguible del ruido de radio cósmico.

¿QUÉ SEÑALES?

Hans Freudenthal (1962) (2) imaginó una lengua artificial, «LINCOS», completamente lógica y basada enteramente en la semántica.

No se puede hablar en LINCOS porque esta lengua está hecha de un sistema de unidades codificadas en el que las diferentes partes de un mensaje están agrupadas en capítulos, párrafos, etc. Esto permite la interpretación de un mensaje, porque el contenido significante se deduce del contenido lógico, distinto del propio sistema lingüístico. El mensaje comienza por una lección de matemáticas, que enseña el sistema de codificación y, al mismo tiempo, enseña la secuencia de números, las operaciones aritméticas, las operaciones lógicas (*verdadero, falso*, por ejemplo). Por medio de la transmisión de una especie de pequeñas piezas teatrales el mensaje da a conocer los esquemas del comportamiento humano (3).

En sentido inverso, lo mismo que Freudenthal inventó una construcción lógica descifrable, que permite comunicar informaciones e incluso un pensamiento, unos extraterrestres podrían hacer otro tanto y dirigirnos un mensaje codificado descifrable que ofreciese información sobre su civilización y su saber. El comienzo de la lección podría ser inteligible, pero el saber de una civilización muy avanzada que tuviese todas las posibilidades de ser muy supe-

rior a la nuestra tal vez no sería fácilmente accesible ni susceptible de ser conocido por nosotros. En *Lifecloud*, novela del astrofísico Fred Hoyle, una entidad inteligente denominada «nube negra» conversa con los terrícolas y, al fin, propone la comunicación de su saber. Se designa a un intelectual de gran renombre para servir de intermediario entre «nube negra» y los hombre, grabando por medio de un sistema de impulsos directamente transmitidos al cerebro el saber de «nube negra». Bien por un exceso de informaciones, bien por una transmisión rápida, bien por contradicción lógica con el cerebro humano, el caso es que la cobaya humana muere.

Además se puede plantear la cuestión de la grabación y de la descodificación. ¿Se trata de un volumen equivalente al del conjunto de todas las bibliotecas terrestres o de diez, cien, mil veces tal volumen? Al presentar concretamente el problema de la comunicación, es inevitable la evocación de los efectos del encuentro entre dos civilizaciones de un nivel muy diferente. En la Tierra un encuentro de este tipo siempre ha sido destructor para la civilización menos evolucionada.

A LA BÚSQUEDA DE LAS SEÑALES DE RADIO

En la hipótesis de los faros de radio apuntados hacia la Tierra, se han llevado a cabo una treintena de experiencias de escucha del cielo durante un tiempo más o menos largo. Es obvio que resulta determinante la elección de la longitud de onda de escucha. Es necesario colocarse en un campo de longitud de onda en el que la emisión de radio del Cosmos (estrellas, materia interestelar, galaxias...) sea la más débil (fig. 18). Pero, incluso al realizar esta opción, queda un amplio intervalo en el que, *a priori*, todas las longitudes de onda son igualmente posibles. Drake (1960) y la mayoría de sus sucesores eligieron la longitud de onda de emisión del átomo de hidrógeno en la Galaxia. Al ser una longitud de onda asociada al elemento más común en el Universo, característica de un proceso específico de emisión, la raya de 21 centímetros parecía ser la opción evidente de los extraterrestres. Para distinguir en medio de la emisión galáctica de 21 centímetros una señal portadora de información, hay que tener éxito en la consecución de una relación señal/ruido muy elevada. Esta condición se ve realizada si la emisión de una CET se efectúa en un intervalo estrecho de longitud de onda, en cuyo caso el ruido galáctico sobre una banda tan ocupada

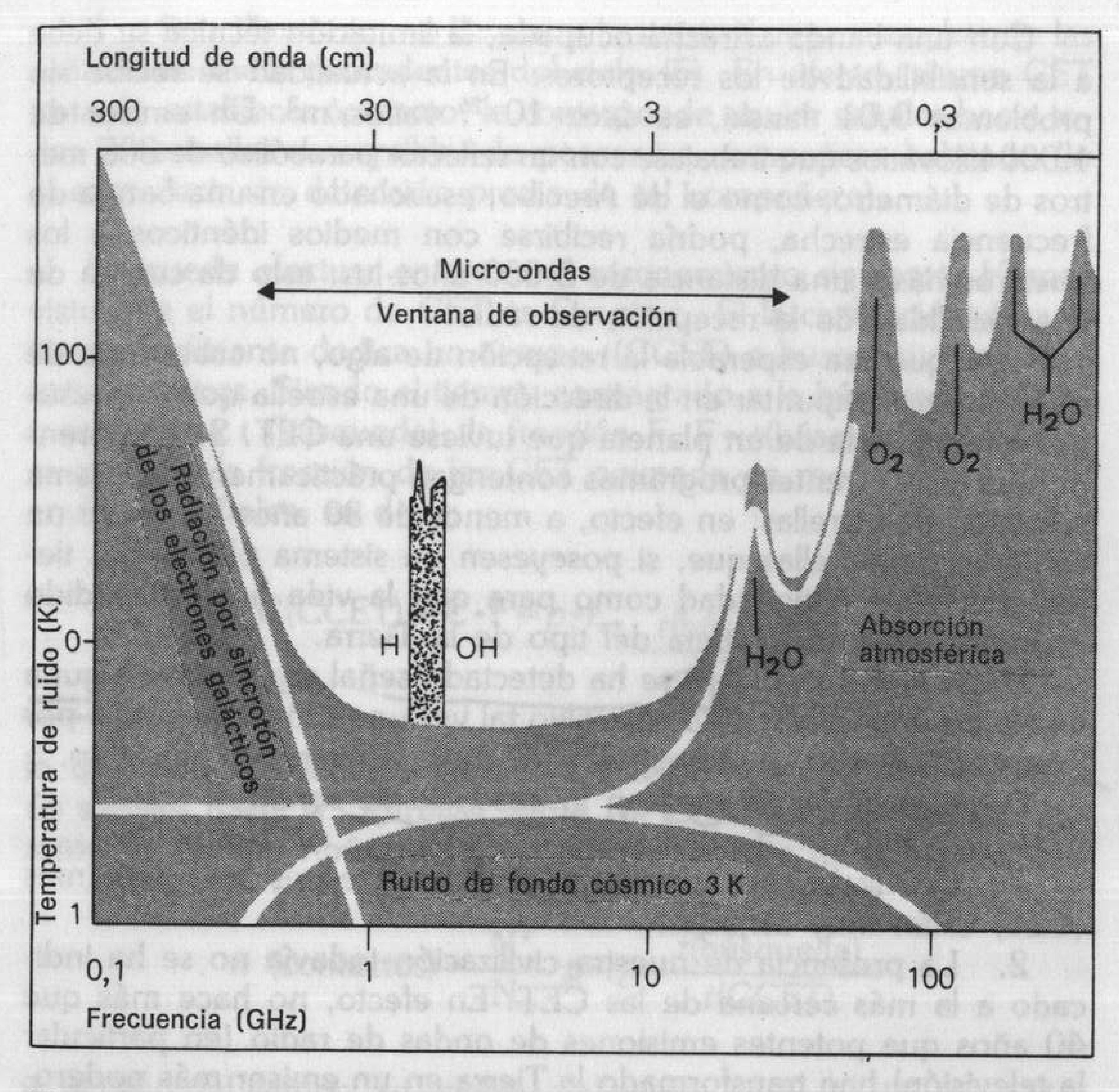


Fig. 18. Potencia irradiada por las diferentes fuentes galácticas en función de la frecuencia. Al ser incoherente tal radiación, cabe expresarla por una temperatura: la temperatura del ruido. La existencia de una «ventana» de entre 3 y 30 centímetros de longitud de onda aproximadamente permite definir un campo favorable a la escucha de señales provenientes del cielo. Mediante un esquema se han mostrado las zonas de emisión de la raya de 21 centímetros de hidrógeno y de la banda de 18 centímetros del radical oxidrilo OH. Un razonamiento antropomorfo sitúa en el borde de estas rayas el campo favorable de escucha de las señales emitidas por una CET.

es débil. La longitud de onda de 18 centímetros, asociada al radical hidroxilo OH, también es característica del medio interestelar. Se han llevado a cabo otros programas con la longitud de onda de 18 centímetros o en sus inmediatas proximidades, a fin de evitar los perjudiciales efectos del ruido de radio de la Galaxia.

Con una banda estrecha ocupada, la limitación técnica se debe a la sensibilidad de los receptores. En la actualidad se recibe sin problemas 0,01 Janski, es decir 10^{-26} vatios/m^2. Un emisor de 1.000 kilovatios que trabajase con un reflector parabólico de 305 metros de diámetro, como el de Arecibo, escuchado en una banda de frecuencia estrecha, podría recibirse con medios idénticos a los nuestros hasta una distancia de 3.000 años-luz: esto da cuenta de la sensibilidad de la recepción de radio.

Para que sea esperable la recepción de algo, no cabe duda de que es preciso apuntar en la dirección de una estrella que se presuma acompañada de un planeta que tuviese una CET. Se comprende que los diferentes programas contengan prácticamente la misma selección de estrellas: en efecto, a menos de 80 años-luz existe un centenar de estrellas que, si poseyesen un sistema planetario, tienen suficiente antigüedad como para que la vida hubiese podido aparecer sobre un planeta del tipo de la Tierra.

Hasta el momento no se ha detectado señal significativa alguna en las experiencias realizadas, salvo tal vez una señal observada por Kraus (1979) con el radiotelescopio de la universidad de Ohio.

Diversas hipótesis explican la ausencia de señal:

1. De hecho, las civilizaciones extraterrestres más próximas (CET) están muy alejadas.

2. La presencia de nuestra civilización todavía no se ha indicado a la más cercana de las CET. En efecto, no hace más que 40 años que potentes emisiones de ondas de radio (en particular la televisión) han transformado la Tierra en un emisor más poderoso que el Sol en el dominio de las ondas métricas. La rotación de la Tierra hace que el emisor-Tierra sea variable, con un período de 23 horas 56 minutos, siguiendo las estaciones visibles u ocultas por la Tierra (fig. 18). El frente de ondas de radio procedentes de la Tierra no ha recorrido todavía más que cuarenta años-luz. Suponiendo que una CET intentara dirigirse a nosotros desde la recepción del primer índice de una civilización próxima al Sol, su respuesta no nos podría llegar más que si esta CET se encontrase a una distancia inferior a 20 años-luz. Es probable que no exista nadie a una distancia tan próxima a nosotros.

3. El comportamiento de las CET de no indicarnos su existencia (4). Esta hipótesis en cierto modo se basa en la socio-psicología de los extraterrestres y por consiguiente escapa a toda crítica y objeción.

4. Sencillamente, no llevamos bastante tiempo escuchando las señales de radio procedentes del cielo (5). En efecto, si una CET trata de establecer contacto, le corresponde enviar señales hacia todas las estrellas susceptibles de poseer un compañero habitado (lo que es decir sin detección previa de tal compañero).

Se puede efectuar entonces el razonamiento siguiente. Hemos visto que el número de CET es $C = p \times t_c$. Si la civilización dura el tiempo suficiente dedica un tiempo t(CCET) a buscar civilizaciones extraterrestres. Siendo el tiempo consagrado a la búsqueda propiamente dicha t (búsqueda), la fracción F, F = t(búsqueda)/t(CCET) es también la fracción de las CET ocupada de modo activo en el envío de señales, es decir:

$$C(\mathrm{CCET}) = C \cdot F = p \cdot t_c \cdot \frac{t(\text{búsqueda})}{t(\mathrm{CCET})}$$

lo que evidentemente supone $t(\text{búsqueda}) < t(\mathrm{CCET}) < t_c$. Enviando señales hacia N^* estrellas, entre N_G estrellas en la Galaxia, durante un tiempo t(búsqueda), el número medio de contactos es:

$$n \text{ (contactos)} = \frac{N^*}{N_G}\, p \cdot t_c \cdot \frac{t(\text{búsqueda})}{t(\mathrm{CCET})}$$

y, al cabo del tiempo, se establece el primer contacto del orden de:

$$t(\text{búsqueda}) = \frac{N_G}{N^*} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{t(\mathrm{CCET})}{t_c}$$

En la Galaxia existen mil millones de estrellas poseedoras de la masa «adecuada», esto es $N_G = 10^9$; en un radio de 2.500 años-luz hay aproximadamente un millón de estrellas que poseen la masa «adecuada», es decir $N^* = 10^6$.

Con $p = 0{,}0005$ y $t(\mathrm{CCET}) \simeq \frac{1}{10}\, t_c$, $t(\text{búsqueda}) =$
$= 200.000$ años

El tiempo de escucha terrestre debe ser, por lo menos, igual al tiempo de búsqueda del contacto de los CCET:

$$t(\text{escucha}) = t(\text{búsqueda}) = 200.000 \text{ años}$$

Puede decirse, pues, que con una duración del tiempo escucha terrestre de veinte años la probalidad de recibir algo sería de 0,01 %.

Una estimación semejante supone una actividad de búsqueda t (CET) de dos millones de años, y requiere, por tanto, una civilizació cuya duración sea como mínimo de 2 millones de años. Con los valores elegidos ($p = 0{,}0005$, $t_C = 2$ millones de años), el número de civilizaciones en la Galaxia es de unas 1.000. En un radio de 2.500 años-luz existen cuatro posibilidades sobre cinco *de encontrar otra* civilización (consiguientemente una posibilidad sobre cinco de *no encontrarla* a menos de 2.500 años-luz). En el mejor de los casos es preciso trabajar durante millares de años antes de recibir una señal que contenga una información. Esto supone que nosotros no hemos sido detectados por la CET más próxima, ni siquiera ópticamente (lo que es difícil pero no imposible), puesto que si la CET hubiese «visto» la Tierra, podría dirigir señales específicas portadoras de información en nuestra dirección. Por el contrario, nosotros ganaríamos tiempo al buscar señales provenientes de un planeta del tipo de la Tierra que ya hubiese sido observado, lo que evitaría tener que barrer todo el cielo a la escucha sucesiva de presuntas CET.

Puede concluirse de este análisis que otros proyectos (por ejemplo el «Cyclope» que examinaremos en el párrafo siguiente) pueden tener un mejor rendimiento científico que la búsqueda al azar de señales portadoras de alguna información.

POR EL AGUJERO DE LA CERRADURA

Las radiaciones que enviamos al espacio permitirían que una CET nos mirase indiscretamente, por así decirlo, que nos espiase por el agujero de la cerradura (fig. 19). De manera recíproca, el enorme proyecto «Cyclope» (un centenar de radiotelescopios de 100 metros de diámetro, distribuidos sobre 20 kilómetros cuadrados), que posee un umbral de detección mucho más bajo que los instrumentos precedentes, así como una mejor directividad, permitiría bien detectar señales extragalácticas, hasta distancias de varios millones de años-luz, bien detectar las «fugas» de radiación de un planeta que poseyese emisores de radio.

Este proyecto, por falta de créditos financieros, no ha visto aún la luz.

A LA BÚSQUEDA DE SEÑALES ÓPTICAS

Al razonar sobre las posibilidades terrestres, presentes o futuras, de dar a conocer nuestra presencia por medio de señales ópticas, es lícito imaginar, en sentido contrario, que hay CET que habrían podido, pueden o podrían dirigirnos señales ópticas. Esta hipótesis es interesante por cuanto la observación de señales ópticas lo bastante intensas no requiere ningún instrumento especializado, basta con la vista. Además, las señales ópticas codificadas habrían podido ser detectadas hace mucho tiempo. Si se tiene en cuenta la antigüedad de la civilización escrita, tales señales habrían podido ser vistas y destacadas hace unos 5.000 años. Si concedemos, como P. Connes (1982), algún efecto sutil a las señales codificadas sobre la evolución, su presencia habría desempeñado una función desde hace millones de años.

Así pues, el punto de partida consiste en pensar en las fuentes de más intensidad que se sepa producir, con haces de diminuta abertura: los láser. Con los láser, una potencia en cierto modo modesta permitiría enviar señales muy precisas de un planeta a otro.

Al fijar la atención en el campo de lo visible, P. Connes (1982) (6) destaca que el ojo existe en los seres vivos desde hace varios centenares de millones de años y el cerebro «inteligente» desde hace algunos millones de años (el esqueleto de «Lucy», hallado en Etiopía, data de hace unos tres millones de años). El autor mencionado, pues, imagina una CET técnicamente muy avanzada, que señala su presencia y que trata de actuar dirigiéndose a especies vivientes poco avanzadas todavía. En razón de la escala de tiempo evolutiva, esta estrategia parece buena, porque se dirige a las especies vivientes sobre una duración más larga y tiene una más alta probabilidad de ser coronada por el éxito.

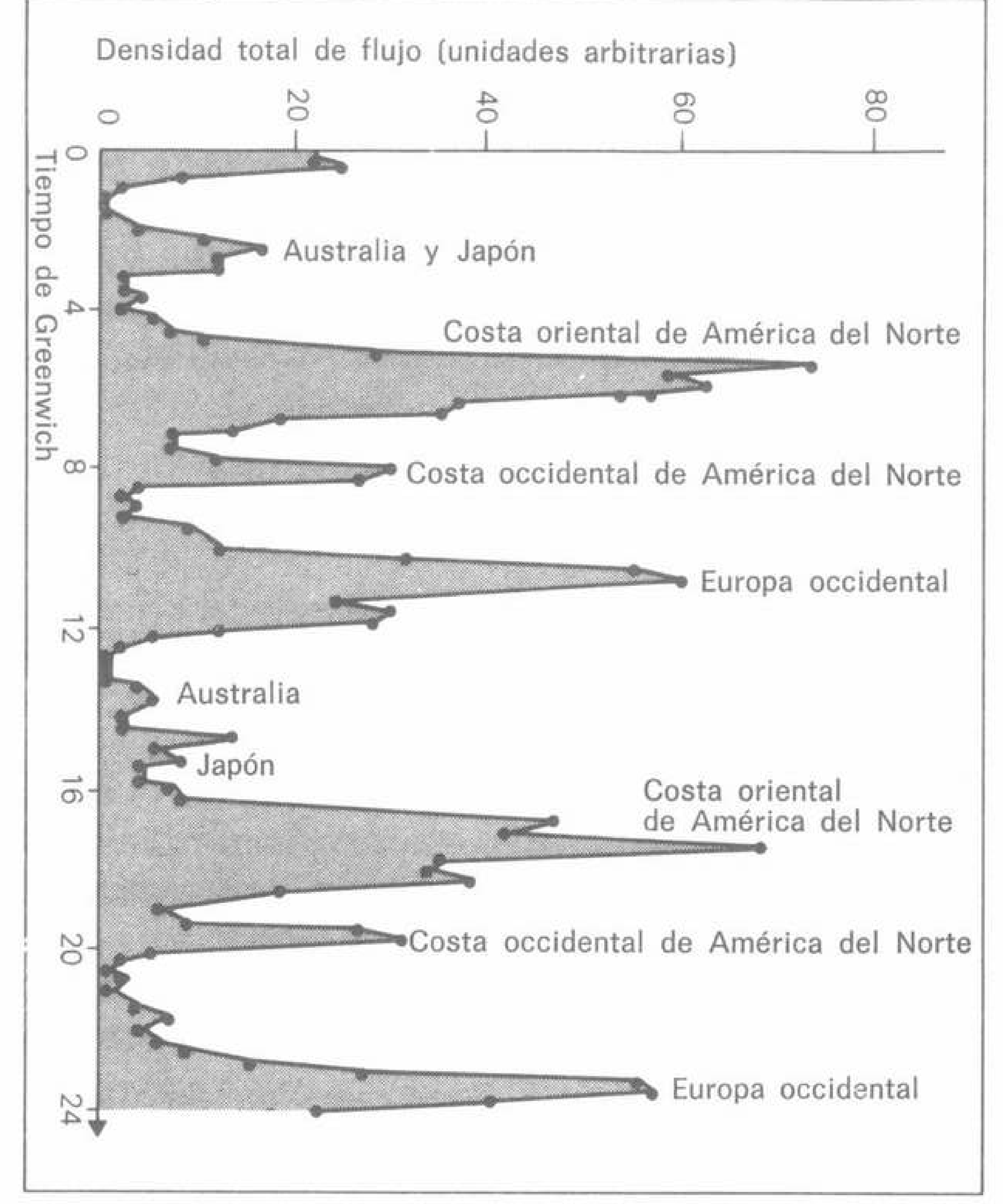
Se trata de imaginar, siguiendo a P. Connes, cómo un mensaje luminoso, visto como una estrella parpadeante, habría podido ser *utilizado* por especies vivientes sensibles a la luz. La idea esencial consiste en tomar en cuenta las extraordinarias cualidades del ojo

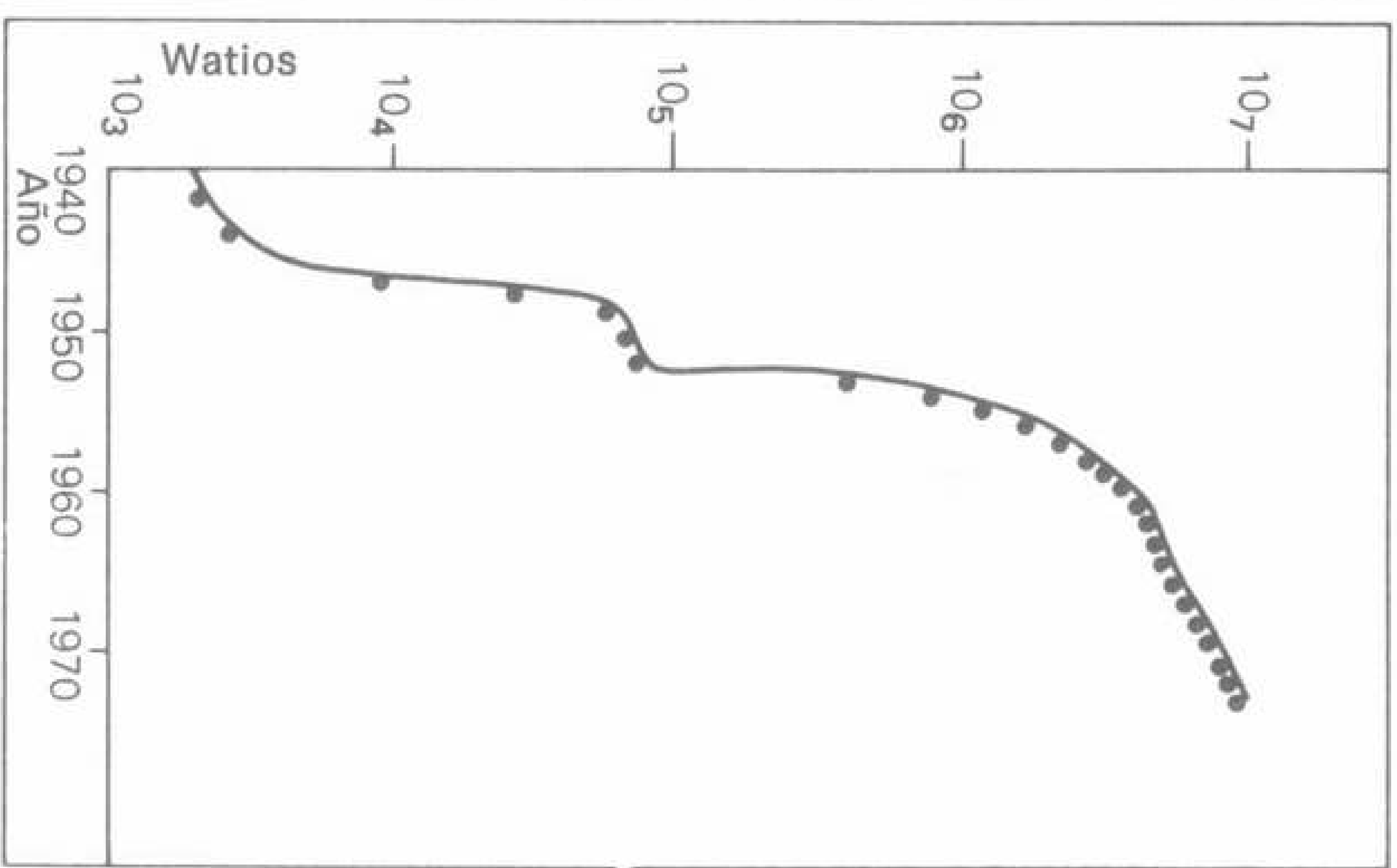
Fig. 19. (A) emisión terrestre en el curso de la rotación de la Tierra y (B) ▶ potencia irradiada desde la Tierra en función del tiempo desde 1940. Para detectar la presencia de una eventual civilización extraterrestre puede esperar la detección de señales enviadas intencionalmente, con el preciso objeto de darse a conocer. Asimismo es esperable que la actividad de esta civilización (industria, transportes, comunicaciones...) tenga como consecuencia la emisión de una gran cantidad de radiación de radio que sería detectable desde un planeta alejado. Tal sería el caso del nuestro, y la figura A muestra la variación en el curso de una jornada (de 0 a 24 horas) de la intensidad del flujo de radio emitido por la Tierra, tal como lo mediría un observador situado a algunos años-luz: advertiría cómo este flujo varía periódicamente en el curso de las veinticuatro horas, a causa de la rotación de la Tierra; el flujo sería máximo cada vez que el observador contemplase América del Norte o Europa. La emisión de ondas de radio está dirigida sobre un plano horizontal para cubrir las zonas habitadas. Así pues, los haces de ondas de radio son vistos dos veces cada 24 horas. La figura B muestra el aumento gradual, desde los años 1940 hasta nuestros días, de la actividad radioeléctrica terrestre debida a las transmisiones televisadas. La potencia media diaria, en vatios, está representada en función del año para el conjunto de todas las transmisiones televisadas del mundo.

en ciertas especies, en los vertebrados (como por ejemplo el ojo de la lechuza) y en los cefalópodos (como por ejemplo el ojo del calamar gigante, que alcanza un diámetro de 25 centímetros con una pupila de 6 centímetros de diámetro, mayor que la abertura del primer anteojo de Galileo [7]). Pierre Connes considera que un mensaje luminoso codificado, visto en el cielo como una estrella parpadeante desde hace mucho tiempo, habría podido favorecer la evolución del ojo, engendrando por ejemplo una comunicación óptica (8)*

A falta de una influencia filogenética, cabe figurarse la influencia de una fuente luminosa condificada sobre una civilización en sus orígenes. Digamos, en primer lugar, que las estrellas variables han sido observadas hace mucho tiempo. Delta Cephi, que varía con un período de 5,2 días de la magnitud 4,1 a la magnitud 5,2, se percibe a simple vista y figura como variable en el Almagesto de

* La idea de una comunicación óptica se encuentra en *Les Xipehuz* de J. H. Rosny (1887). Simak en *Way Station* (1963) imagina un sistema de comunicación basado en las complicadas oscilaciones de un ser viviente esferoide que vive en un medio acuático.





Tolomeo (hacia 100-170); las supernovas históricas han sido observadas; las variables periódicas catalogadas (como *Mira Ceti*, la Maravillosa de la Ballena, que, en 331 días, pasa de la magnitud 2 a la magnitud 10, para volver después a un máximo). Puede pensarse entonces que una estrella parpadeante, no sólo variable, sino emisora de señales bien perceptibles a simple vista, habría podido figurar al lado del Sol, de la Luna y de los planetas en la galería de los dioses. Pero en el transcurso de los últimos 6.000 años no se ha observado ni analizado estrella alguna parpadeante que hablase en morse o en cualquier otro sistema codificado.

¿DÓNDE ESTÁN LAS CIVILIZACIONES EXTRATERRESTRES?

Pierre Connes examina la ausencia de todo mensaje óptico evidenciando las cuestiones siguientes:

1. ¿Cuál es la frecuencia de aparición de las CET?
2. ¿Qué limitación existe a la expansión de las CET?
3. ¿Qué limitación existe al establecimiento de comunicación con las CET?

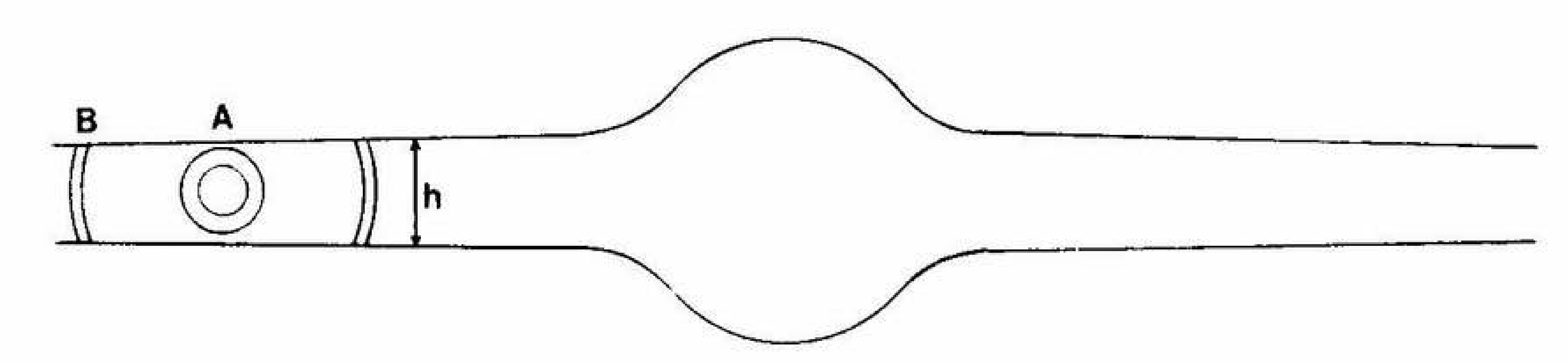


Fig. 20. *Número de civilizaciones en función de la distancia en la Galaxia.* La distribución de las estrellas en un disco galáctico proporciona una diferente ley para el número de CET, según el volumen considerado se halle en la anchura del disco (A) o, por el contrario, divida el disco galáctico en anillos (B). En A, el número de CET viene dado por $N = \frac{4}{3}\pi r^3 c$, donde c es el número de CET por unidad de volumen. $N = 1$ define una distancia $r = (3/4\pi c)^{1/3}$: la distancia r de la CET más cercana es proporcional a $c^{-1/3}$. En B se tiene aproximadamente un número $N = 4\pi r^2 hc$, donde h es la anchura del disco galáctico. $N = 1$ define una distancia $r = (1/4\pi hc)^{1/2}$ y la distancia r de la CET más cercana es proporcional a $c^{-1/2}$.

Un análisis cuantitativo que especule sobre: 1) la frecuencia de las civilizaciones en la Galaxia; 2) la rapidez de los progresos tecnológicos, y 3) la voluntad de comunicar *permite poner de manifiesto una enorme restricción sobre la antigüedad de las civilizaciones extraterrestres*. La discusión de éstas conduce (audazmente) a consideraciones sociopolíticas sobre la conducta de los extraterrestres. Al reproducir estas consideraciones, trataré de guardar el sentido del humor.

Llamemos t_C a la antigüedad de una civilización. En la segunda parte vimos que el número C de planetas portadores de una civilización podía escribirse:

$$C = p\ t_C$$

donde p es el número de planetas *habitables* que cada año aparecen en la Galaxia. Habíamos considerado como verosímil el valor $f = 0{,}0005$/año.

Estas civilizaciones están diseminadas en un disco galáctico de unos 100.000 años-luz de diámetro, lo que deja evaluar la distancia de la civilización más próxima. Esta distancia varía como la inversa de la raíz cuadrada de C para las grandes distancias y como la inversa de la raíz cúbica de C para las distancias inferiores al espesor del disco galáctico (fig. 20); se obtienen los números siguientes (ver también la curva $p = 0{,}0005$ en la fig. 21):

Duración de una civilización	*Distancia de la CET más cercana (años-luz), para* $p = 0{,}0005$/*año*
100 años	130.000
10.000 años	13.000
1.000.000 años	1.300
100.000.000 años	180

Supongamos ahora que una civilización de alta tecnología haya emprendido la construcción en el espacio de un telescopio descomunal destinado a dirigir hacia nosotros la luz de un láser de potencia gigantesca. Esto es posible si una civilización situada a 300 años-luz dispone de un espejo óptico de 2 kilómetros de diámetro, de un láser de 300 millones de vatios y es capaz de dominar la direc-

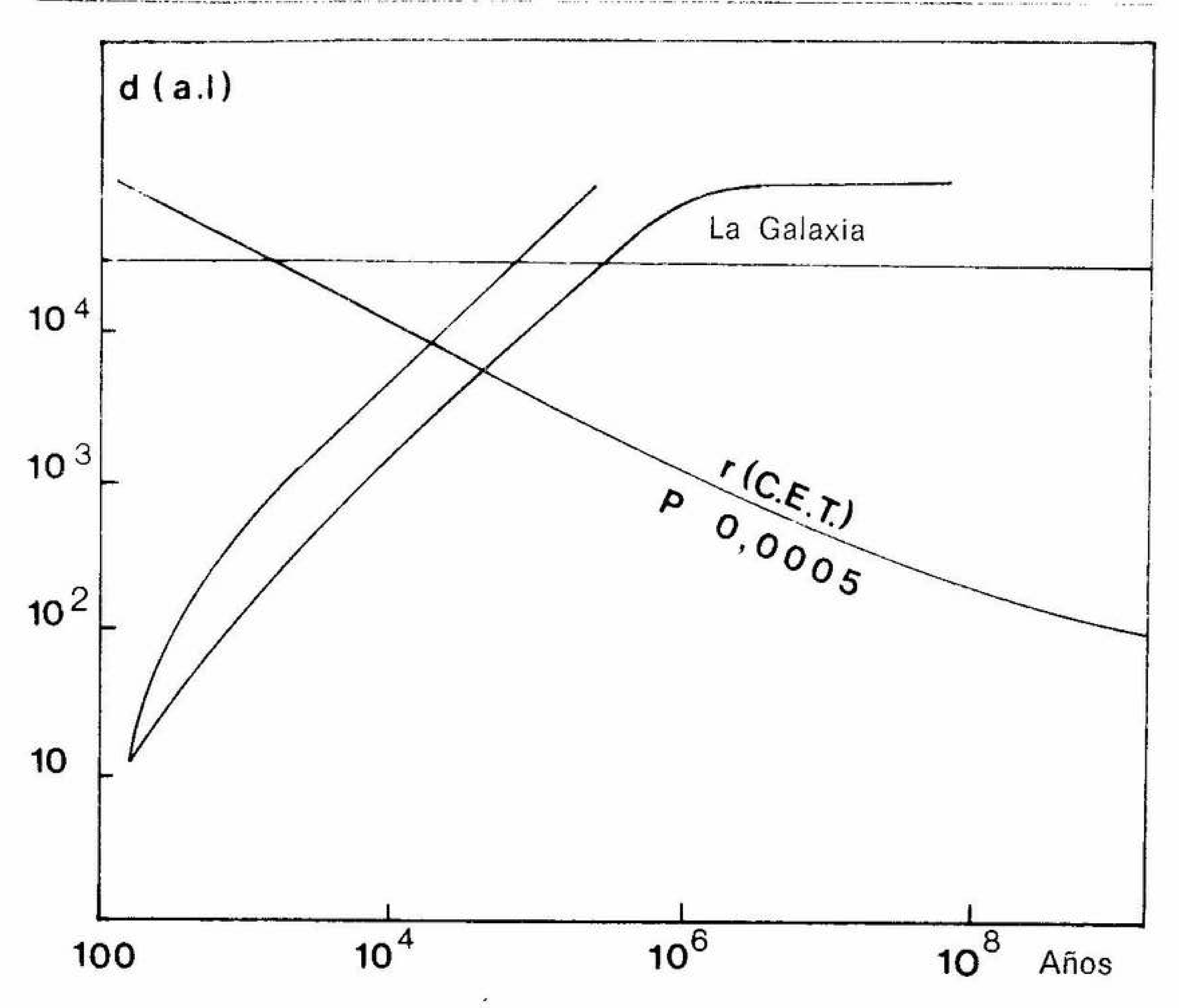


Fig. 21. Distancia más próxima de las CET para una tasa anual de aparición de planetas «adecuados» $p = 0{,}0005$ en función de la duración t_c de la civilización (curva *r* [CET]) y del alcance de los faros interestelares. De acuerdo con la ley A, el alcance de los faros aumenta indefinidamente con el tiempo. De acuerdo con la ley B, el alcance llega hasta un máximo (determinado aquí de forma arbitraria en 10.000 años-luz). La dimensión de la Galaxia está representada por una línea horizontal.

La intersección de las curvas A o B con la curva *r* (CET) define la duración mínima de una CET que desee comunicarse en la Galaxia. Con arreglo a la teoría de P. Connes, la ausencia de señales provenientes del firmamento significa que no puede existir CET alguna más allá de algunas decenas de millares de años (ver texto).

ción del haz con una precisión de 10.000 millonésimas de segundo de arco. Si se considera la capacidad de los instrumentos que ya se han colocado en el espacio, no parecen accesibles en la actualidad semejantes logros, pero en un futuro más o menos próximo quizá no sean imposibles. Citemos, a título de ejemplo, la idea

de Antoine Labeyrie de suspender una membrana reflectante de 100 metros de diámetro sobre una superficie interferencial de luz coherente (9). La presión de radiación de un láser potente, manipulada mediante un juego de espejos, mantiene la membrana en su sitio en el espacio con una precisión perfecta. Sin duda no se sabe cómo lanzar esta membrana a su lugar en el espacio, y habrá que llevar a cabo una investigación tecnológica apropiada, pero, en principio, la cosa es factible. Los fenómenos de crecimiento tecnológico, de los que hemos hablado en la tercera parte, los relevos sucesivos de tecnologías nuevas, invitan a soñar con instrumentos extraordinarios.

La CET que imaginamos construye faros ópticos de alcance creciente a fin de enviarnos mensajes y de hacernos conocer su presencia. Suponiendo que esta CET arranca de nuestro nivel tecnológico y dura X años, al cabo de este intervalo de tiempo ella realiza un instrumento que alcanza una distancia de *d* años-luz.

Parece evidente que si una CET lanza señales, lo hace con la esperanza de recibir algo a cambio. Ella calcularía, pues, sobre una vida de la civilización X superior al tiempo de ida y vuelta 2 (d/c). La ausencia de señales puede interpretarse de dos maneras: o bien las CET no han emitido nunca nada, o bien en un período de duración determinada (por ejemplo los últimos 5.000 años) han cesado de emitir.

La distancia *d* en la que se busca el contacto está determinada por el alcance de los instrumentos. Es preciso, por tanto, que la duración de la vida de una civilización semejante sea superior a 2 (d/c), donde *d* es el alcance de los instrumentos y *c* la velocidad de la luz.

A modo de ejemplo, sigamos las hipótesis de P. Connes. Si el alcance de los faros interestelares aumenta como el cuadrado del tiempo (en 100 años, 10 años-luz; en 1.000 años cien veces más, es decir 1.000 años-luz, ¿por qué no?; un crecimiento todavía más rápido tendría el mismo efecto), se obtienen los resultados siguientes: el alcance de los faros interestelares llega a la civilización más próxima al cabo de 3.000 años aproximadamente (de hecho, en algún punto entre los 1.000 y los 10.000 años). Puede establecerse la comunicación si la vida de la civilización es suficiente, es decir si dura más tiempo que el de ida y vuelta a la velocidad de la luz en una distancia igual a la del alcance de los faros. En nuestro ejemplo eso quiere decir que si esta civilización pone en funcionamiento faros que tengan un alcance de 1.000 años-luz, debe durar 2.000

años para que podamos recibir una respuesta adecuada de vuelta.

Los números anteriores claro está que no tienen más que un valor ilustrativo, pero dan pie a algunos razonamientos.

Una civilización que dure más de 1.000 años tendría tiempo de construir un faro interestelar y hacer uso del mismo. Si dura más de 2.000 años puede entrar en comunicación con una civilización vecina, situada a 500 años-luz (1.000 años de construcción más 1.000 años de ida y vuelta de la señal).

Es posible considerar otras tasas de crecimiento de los medios tecnológicos. En la hipótesis en la que el mismo tipo de crecimiento se aplica a todos los campos tecnológicos, es preciso esperar más bien una aceleración del crecimiento que un efecto de saturación. Entonces se traslada al mismo diagrama (fig. 21) la distancia *d* (CET) de la CET más cercana en función de su duración de vida t_c y la distancia *d* (tec) tecnológicamente realizable que asegure el contacto al cabo de un tiempo t_C. De hecho, la CET construye en la época X_1 un instrumento de alcance *d* (tec). En la época $X = X_1 + 2$ (d[tec]/c) será cuando regrese la señal. Sea cual sea el crecimiento de los medios tecnológicos, siempre es el estado de la técnica en la época en la que son lanzadas las primeras señales el que, de manera predominante, determina la duración necesaria de la civilización para obtener una señal de vuelta, salvo si la tecnología termina por estancarse y tocar un techo. De todas formas, si se mantiene la hipótesis de la construcción de los faros interestelares, el contacto debería tener lugar. *Como el contacto no ha tenido lugar*, no existe CET alguna a menos de 10.000 años-luz.

CONTACTOS Y TIPOS DE CIVILIZACIÓN

Llegados a este punto, examinemos si tal conclusión es irrefutable.

1. El número de civilizaciones en la Galaxia, en una hipótesis tipo, sería de:

$$C = 0{,}0005\ t_C$$

De hecho, el número de CET podría ser mucho menor. Una hipótesis pesimista es:

$$C = 1{,}2 \cdot 10^{-6}\ t_c$$

Con una duración de un millón de años, esto representa una civilización en nuestra Galaxia... por el momento: la nuestra. Así pues, la CET más próxima está en una galaxia vecina. La ausencia de contacto óptico podría deberse a la distancia.

No obstante, esta conclusión es refutable por cuanto supone un límite al alcance de los faros interestelares. Ahora bien, *a priori*, no podemos poner límites a la dimensión de los espejos, a la precisión de su orientación, a la potencia aplicada. En lo que se refiere a la potencia, hay un sorprendente cálculo debido a Kardashev. Kardashev (1964) imagina tres tipos de civilizaciones de los que no retendremos más que el primero: las civilizaciones del tipo I son aquellas que dominan una potencia comparable a la potencia total disponible sobre la Tierra (4.000 millones de Kw). No se trata, sin embargo, más que de una ínfima fracción de la energía recibida cada segundo del Sol: 0,002 % tan sólo (10).

En el caso de que la CET, por su dominio energético, perteneciese al tipo Kardashev I, podría intervenir ópticamente sobre la Tierra desde una distancia descomunal. Siendo así, la ausencia de señales ópticas no derivaría más que de los problemas de existencia de las CET.

2. La evolución de una civilización conduce necesariamente a una limitación del crecimiento: el crecimiento en progresión geométrica de la población va demasiado rápido para que sea posible enfrentarse con él por medio de alguna técnica (11). Cuando se examina la evolución de una población animal, se comprueba que su crecimiento está limitado por los recursos alimenticios. Si faltan, la población disminuye y se verifica que al cese del crecimiento siempre sucede un nuevo desarrollo. Se puede plantear la hipótesis de que toda civilización, en un momento dado, toma de manera consciente las medidas necesarias para dominar su crecimiento y su desarrollo. Cabe pensar también que todas las CET, capturadas en la trampa del crecimiento exponencial y de la necesidad imperativa del control de la población, terminan por abocarse a una situación en la que todos los recursos alimenticios, energéticos, mineros se utilizan para sobrevivir, de tal forma que no queda medio alguno disponible para el establecimiento de una comunicación con otra civilización galáctica como la nuestra.

3. Por último, la voluntad de comunicar puede desaparecer. Pero, ¿por qué desaparecería en *todas* las civilizaciones extraterrestres? Hemos visto que la comunicación interestelar no conduce a resultados más que si se continúa con ella durante, al menos, miles

de años. El abandono de la comunicación resulta bien de una opción racional (pero la racionalidad no tiene por qué guiar hasta una opción única, a menos que se exija mucho del principio de convergencia), bien de las consecuencias de conflictos militares que hayan estallado en el seno de las CET. Esta última hipótesis supone que toda civilización es autodestructiva y que su duración es limitada (1.000, 10.000, ... años). La ausencia de señales ópticas sería debida a que ninguna civilización extraterrestre habría durado el tiempo suficiente como para lograr emitir. P. Connes, a través de esta última hipótesis, expresa un punto de vista pesimista sobre la humanidad, sobre los peligros que resultan del acceso cada vez más fácil a las armas exterminadoras, sobre la creación por mutaciones accidentales de un número creciente de esquizofrénicos y de paranoicos hasta el momento en que uno de ellos arroje la bomba que prenda fuego al planeta y haga perecer a los supervivientes en el desastre del invierno nuclear.

Esta visión catastrofista ignora, al parecer, el hecho de que la evolución biológica va mucho menos rápida que la evolución social y técnica, a no ser que el talento genético no termine, en un futuro próximo, por dar vida al destructor de la civilización. Este razonamiento se asemeja a las historias de ciencia ficción, está compuesto de analogías, de especulaciones a partir de la historia de la humanidad y no puede desarrollarse si no se rechazan los datos científicos, o incluso sociales, que molesten a su lógica intrínseca. La paradoja de la versión catastrofista es que ignora las posibilidades existentes todavía en el campo de la ficción o de la imaginación científica.

Henos aquí, pues, ante una serie de explicaciones «sociológicas» de la ausencia de mensaje de las CET, cuyo resumen es conveniente recordar antes de abordar su crítica:

a) Conflictos internos, inestabilidad social de las CET, que tienden a la autodestrucción.

b) Incapacidad de dominar el crecimiento demográfico que absorbe todos los medios disponibles o que engendra conflictos de poder.

c) Abandono del deseo de comunicarse (12).

El abandono universal del deseo de comunicarse (tercera hipótesis) parece difícil de admitir, como más arriba hemos dicho. Si se consideran las otras dos hipótesis, digamos que nuestro sentido de lo racional se acomoda mal a un comportamiento futuro de las CET tan análogo al comportamiento de las civilizaciones terrestres tal como nos lo revela la historia, es decir, un comportamiento gobernado por la violencia.

La violencia, comprendida en ella la guerra, no siempre ha sido objeto de repulsa. Los defensores del «darwinismo social» del siglo pasado le hallaban un papel positivo, ya que conducía a la «supervivencia de los más aptos», término que aquí alude a la civilización mejor, a la que más merecía el triunfo. Para K. Marx la violencia de las masas es la respuesta a la violencia institucionalizada por las condiciones económicas y sociales del capitalismo.

Puede pensarse que la violencia del hombre predador, del agresor, del defensor del territorio, hunde sus raíces en la estructura de nuestro cerebro. Newman y Sagan (1983) (13) plantean explícitamente la hipótesis de que la evolución biológica puede conducir a una nueva estructura cerebral que deje de producir todas estas pulsiones. S. J. Gould (14), por el contrario, muestra que este comportamiento humano quizá tenga más un origen cultural que genético. En las CET que agrupasen a esta nueva especie de seres inteligentes, la solución pacífica de los conflictos y de las dificultades propiciaría un progreso ilimitado. Tales CET podrían durar así mucho tiempo, tender hacia un estado de civilización del que carecemos de idea y, eventualmente, abandonar el deseo de comunicarse.

No podemos por menos de sentir malestar ante este tipo de utopía. La violencia no se reduce sólo a su forma más extrema, la guerra. La violencia institucional no es menos violenta que la violencia física. En una época en que las perspectivas de manipulación genética dejan entrever una evolución dirigida por los genetistas que reemplace a la evolución natural, se vislumbra la posibilidad de una increíble violencia de Estado. En resumen, el sistema de explicaciones que acabamos de esbozar produce insatisfacción. Si las CET no han establecido contacto con nosotros, tal vez sea simplemente que esto es muy difícil en razón de la distancia. La ausencia de contactos en la tercera fase también mueve a examinar el papel de la distancia, pero ahora desde el punto de vista de la exploración y de la colonización de la Galaxia.

COLONIZACIÓN

«Si no se les ha visto, es que no existen.» Esta observación de Shklovsky ha sido mencionada una y otra vez por numerosos auto-

Fig. 22. *Difusión.* Las curvas proporcionan la distribución de borrachos ▶ agarrados a faroles pares: en el punto de partida (A), tras dos desplazamientos (B), 4 desplazamientos (C), 6 desplazamientos (D), 8 desplazamientos (E), 32 desplazamientos (F) (atención al cambio de escala), 128 desplazamientos (G) (cambio de escala), 16.384 desplazamientos (H). En este último caso se observará que, tras 16.384 desplazamientos sucesivos de 10.000 borrachos, quedan todavía 44 agarrados al farol de partida, 16 al ± 128, 1 al ± 249, y que hay 32 agarrados a los 15.886 faroles restantes.

res, por ejemplo Tipler (1980), Sagan (1983) (15). Toda la discusión gira en torno al análisis siguiente: una civilización colonizadora (basta con una en la Galaxia) ocuparía, uno a uno, todos los planetas habitables o hechos habitables de la Galaxia. Desplazándose a una velocidad suficiente de planeta habitable en planeta habitable, puede estimarse que le serían suficientes menos de cien millones de años para ocupar toda la Galaxia (a continuación se va a examinar esta estimación; más adelante se verá que la estimación de la velocidad es secundaria). Ahora bien, como los representantes de esta CET no han llegado hasta nosotros, la conclusión es que no existen.

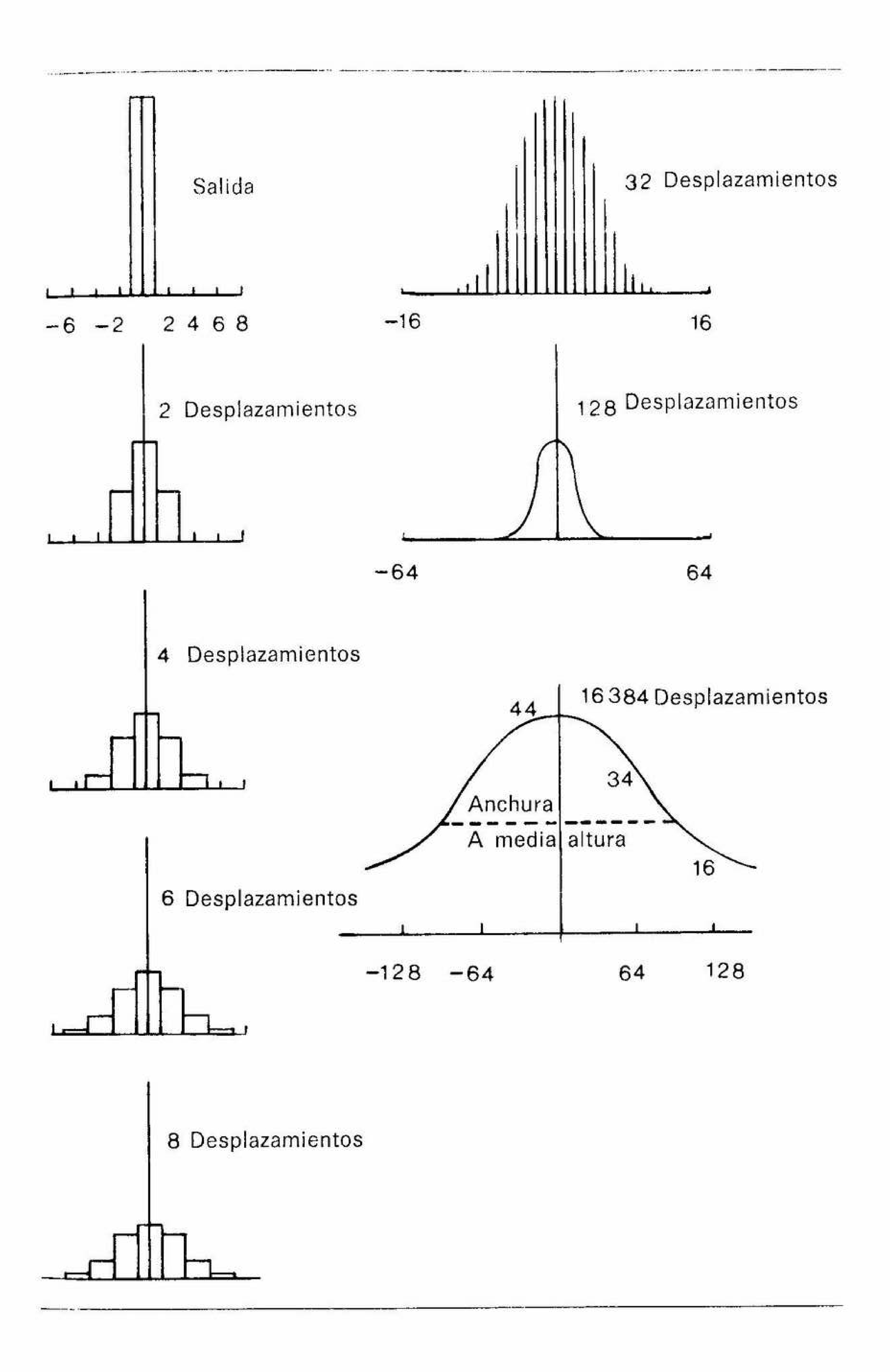
La suposición evidente es que una civilización, al menos una, que alcance la edad de los viajes interestelares es todavía una civilización colonizadora, y esto por diversas razones: demográficas, económicas, culturales, o incluso astrofísicas, que el planeta esté en trance de convertirse en inhabitable: por ejemplo, una estrella un poco más masiva que el Sol que inicia su desarrollo hacia el estado de supergigante en los albores del desarrollo tecnológico de la civilización reinante en el planeta en cuestión.

El salto lógico consiste en extrapolar el comportamiento humano al comportamiento de los extraterrestres. Pero, a partir del mundo actual, ¿podemos realizar semejante extrapolación? También podemos admitir que existan extraterrestres que no tengan interés alguno en la exploración y en la colonización de la Galaxia. Pero semejante actitud, ¿sería la de todas las CET?

No queda más que analizar con detalle el mecanismo de la expansión colonizadora* a partir de un modelo sencillo que permita,

* La colonización no es el colonialismo y no significa de modo necesario la esclavitud de los autóctonos por parte de los invasores.

¿Sí? ¿y si extrapolamos a la Humanidad y su historia? ¿el desplazamiento de especies?



por otra parte, describir fenómenos en apariencia muy diversos: la difusión de una epidemia de peste (la de 1347); la dispersión del ratón almizclero, *Ondathra zibethica*, desde su introducción en Europa, en 1905; el avance de la civilización a partir de la costa este de los Estados Unidos de América. Todos estos fenómenos, como el paso de un gas a través de un medio poroso, responden al mismo mecanismo, al mecanismo de difusión.

Aparece con tanta frecuencia este mecanismo en la naturaleza que conviene explicar su funcionamiento.

DIFUSIÓN

La base del mecanismo de difusión es la *marcha al azar*. El modelo clásico es el del borracho, agarrado a un farol que suelta sólo para alcanzar uno de los dos faroles vecinos, sin ser capaz de dominar el paso hasta la elección realizada. Al cabo de un cierto tiempo de estacionamiento T cerca del farol n, lo abandona para alcanzar uno u otro de los faroles $n+1$ ó $n-1$.

Imaginemos una fila muy larga (¿infinita?) de faroles y N borrachos, que salen de la misma taberna y que parten del mismo farol. Al cabo de un cierto tiempo t, tras n desplazamientos al azar, los N borrachos se encuentran agarrados a los faroles 0, 1, 2...n,... y -1, -2, -3,...$-n$. Se dice que el tropel de borrachos se ha difundido (figura 22). Este mecanismo posee dos características esenciales: el tiempo de estacionamiento y el carácter completamente aleatorio de cada paso de la estación n a la estación $n+1$ ó $n-1$. Produce un escalonamiento progresivo de la banda de borrachos, con un máximo del número de borrachos en la proximidad de la línea de partida. La extensión —contada en número de faroles— de la región en la que, por ejemplo, se encuentra la mitad del número de borrachos, aumenta muy lentamente con el número de desplazamientos (fig. 23); el modo de crecimiento de la zona cubierta depende de los detalles del proceso.

¿De qué forma es posible transferir estas propiedades a la dispersión de una especie (el ratón almizclero), la instalación de colonos, la difusión de la peste negra? Hay pequeñas diferencias que de forma evidente marcan los diferentes procesos, pero siempre se registran las características fundamentales: instalación en un punto, seguida de un tiempo de latencia tras el que se produce una nueva instalación en un punto tomado al azar y situado más lejos.

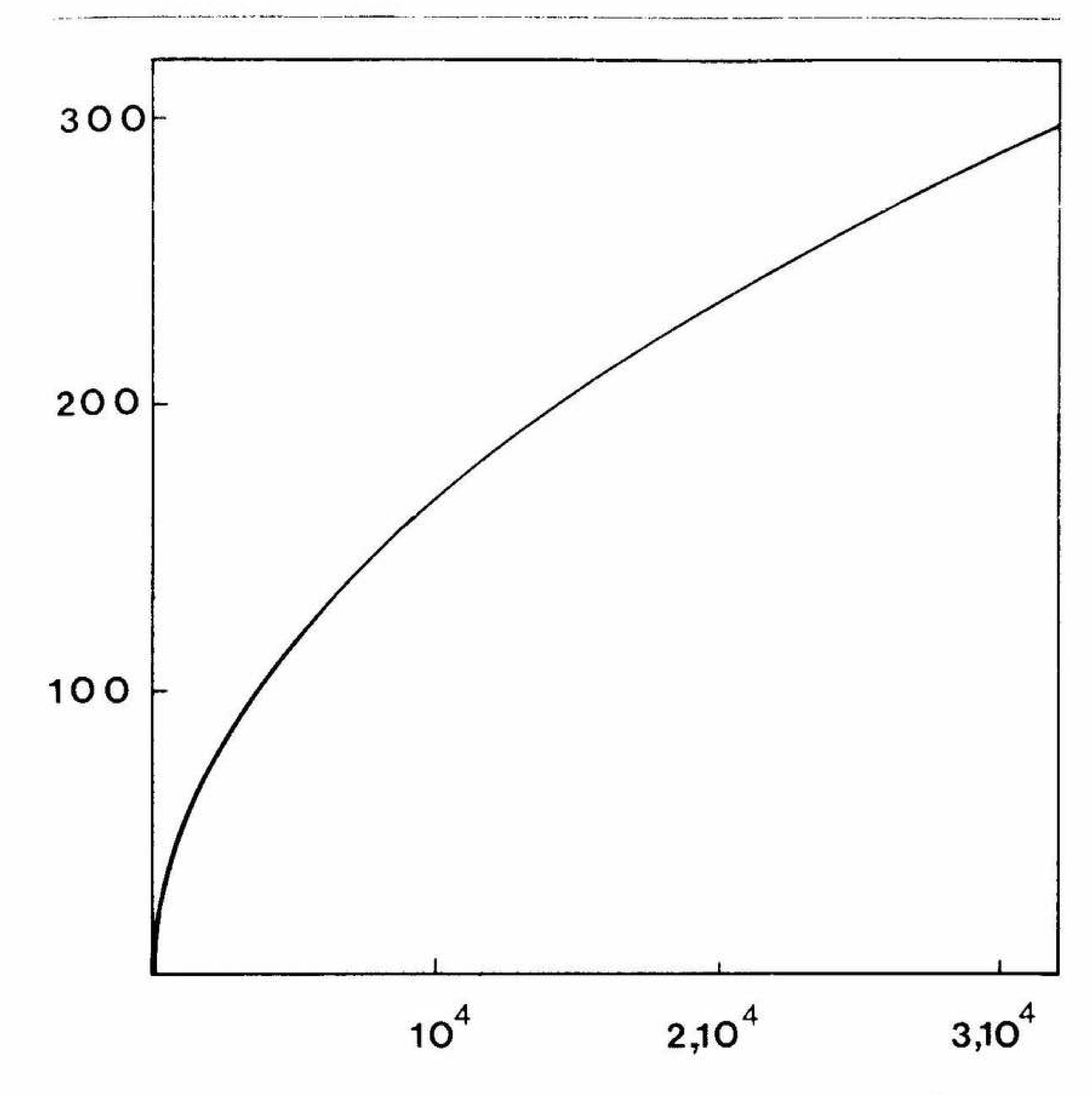


Fig. 23. La curva en forma de campana que ofrece la distribución de los borrachos (campana de Gauss) se desarrolla progresivamente. La anchura a la altura media aumenta como la raíz cuadrada del número de desplazamiento: vale 9,4 tras 32 desplazamientos; 18,8 tras 128 desplazamientos; 212 tras 16.384 desplazamientos.

Latencia y marcha al azar son los dos aspectos esenciales del mecanismo de difusión. En el caso de una población, hay que añadirle el motivo de la nueva instalación, que es la presión demográfica. Así, las colonias de mapaches se componen de siete u ocho individuos. Cuando nacen uno o dos, los animales en exceso se van o mueren, de modo que, en el territorio, la colonia conserve el mis-

Aspectos esenciales del mecanismo de difusión.

mo número de individuos. La tasa de crecimiento de la población animal define el tiempo de latencia, tras el cual se produce el salto, la instalación de otra colonia. La extensión cubierta por las diferentes colonias hace intervenir la velocidad con que los emigrantes se desplazan de un punto a otro.

La tasa de crecimiento de la población, la velocidad del recorrido definen por completo el proceso de difusión de una población.

Existen numerosos ejemplos históricos para ilustrarnos cómo la velocidad a la que progresan las implantaciones sobre el terreno (que a partir de aquí denominaremos *celeridad*) es mucho menor que la velocidad mecánica de desplazamiento. Hay algunas órdenes de magnitud que son interesantes. *Roma no se hizo en un día*, aunque pueda atravesarse toda la ciudad a pie en un día. Un peatón se desplaza a 4 kilómetros por hora aproximadamente, lo que no hace más de 30 kilómetros al día. Pero se han necesitado 2.500 años para construir una ciudad que se extiende sobre 30 kilómetros: la relación de la celeridad de expansión con la velocidad mecánica de desplazamiento es de 1/1.000.000:

$$\frac{\text{Celeridad de la expansión}}{\text{Velocidad de desplazamiento}} = \frac{1}{1.000.000}$$

Roma

La colonización de la costa este de los Estados Unidos en los siglos XVII y XVIII se hizo con más rapidez. La celeridad de la expansión es del orden de 10 kilómetros por año, al ser la velocidad de un hombre al paso de unos 5 kilómetros a la hora, se tiene la relación:

$$\frac{\text{Celeridad de la expansión}}{\text{Velocidad de desplazamiento}} = \frac{1}{500.000}$$

Estados Unidos

En el supuesto de que una CET progresase de planeta habitable en planeta habitable, conocidos su tasa de crecimiento de la población (presión demográfica), su tiempo de latencia y su velocidad mecánica de desplazamiento, sería posible calcular su celeridad de expansión.

Este cálculo no tiene otro objeto que el de hacerse una idea de lo que podría pasar. *De ninguna forma podría pasar por una teoría de un fenómeno que no ha sido observado*. No se le puede atribuir el carácter de predicción de una teoría física. A partir de estos cálculos, los razonamientos que cabe hacerse conducen a conclusiones verosímiles, pero nada más.

La hipótesis principal es que la expansión se debe a una emigración, emigración que, en sí misma, tiene por motor el crecimiento de la población. Para evitar las catástrofes del crecimiento en progresión geométrica, se admite que la limitación de recursos termina por implicar una limitación del crecimiento.

A partir de un planeta P, se lanzan expediciones destinadas a la instalación de colonias en otros planetas P', P'', donde la tasa de crecimiento es más rápida que en el planeta de partida, hasta el momento en que se lanzan más lejos nuevas expediciones. En este tipo de representación, si la velocidad de las naves espaciales no es demasiado débil, la celeridad de expansión de la civilización está determinada por la tasa de crecimiento de la población y por la tasa de emigración.

Hay mucho de arbitrario cuando se trata de elegir los valores numéricos de la tasa de crecimiento y de la tasa de emigración.

¿Hay que elegir la tasa de crecimiento de la población terrestre de mediados del siglo XX (un 2 % por año) o la que precede a la Revolución industrial (un 0,01 % por año)? ¿Hay que elegir la tasa de emigración de Europa hacia los Estados Unidos en el siglo XVIII (un 0,03 % por año) o tratar de imaginar tasas más realistas para la emigración espacial (10.000 personas por siglo sobre una población terrestre de 10.000 millones de habitantes, es decir una tasa de 10^{-8} por año?). La celeridad efectiva con que se propaga la onda de colonización (que no es, recordémoslo, la velocidad de desplazamiento de las naves espaciales) está comprendida entonces entre algunas centésimas de años-luz por año y unas diezmilésimas de años-luz por año, es decir, por término medio algo que está entre los 30 y los 500 kilómetros por segundo. Esto no tiene nada de extravagante. Las sondas espaciales, como el *Voyager*, abandonan el sistema solar a la velocidad de 40 kilómetros por segundo y técnicamente parece razonable que se alcancen velocidades mucho mayores (1/10 de la velocidad de la luz).

Incluso a razón de una celeridad de expansión de «sólo» 30 kilómetros por segundo, una CET habría creado colonias en toda la Galaxia al cabo de 300 millones de años. Poco importa si este razo-

namiento y estas estimaciones nos indican un tiempo de colonización de 60 ó de 300 millones de años. Esta diferencia de un factor 5 no cambia nada el hecho de que la Tierra no parece haber sido visitada jamás por una civilización extraterrestre. Antes de reflexionar sobre el gran silencio de la Galaxia, debemos exanimar todavía otra hipótesis, la de los robots.

LA LLEGADA DE LOS ROBOTS

En los albores de la era de los computadores, en 1951, John von Neumann (16) hizo la observación de que el mecanismo biológico de reproducción lleva a descendientes que son al menos tan complicados como los padres. De hecho, la evolución de los seres organizados ha ido acompañada de manera progresiva por un alargamiento del mensaje genético, es decir que, de vez en cuando, aparecen descendientes más complicados que sus padres.

Von Neumann observa igualmente que en la producción en cadena de máquinas a cargo de otras máquinas se espera más bien una disminución de la complejidad: las máquinas producidas son menos complicadas que las máquinas productoras. Las máquinas-herramientas secuenciales de mando numérico producen, casi sin mano de obra, órganos de máquinas mucho menos complicadas que ellas mismas.

En 1951 Von Neumann demostró un importante teorema matemático según el cual era posible, en principio, concebir máquinas de cualquier complejidad, capaces de reproducirse a sí mismas. Esta asombrosa capacidad no se alcanza más que cuando la máquina supera un cierto umbral, muy elevado, de complejidad. Arbib (1974) (17) da una idea de lo que puede ser una máquina de Von Neumann (fig. 24). Se supone, en principio, que los constructores de la máquina de Von Neumann son capaces de escribir el programa que la haría funcionar.

A condición de escribir el programa I_n con sumo cuidado, una máquina polivalente A, o constructor universal, puede obedecer el programa y construir una máquina N, pieza a pieza, a partir de materias primas contenidas, por ejemplo, en un asteroide. Si el programa ordena construir una máquina A, el constructor universal construirá una réplica exacta de la máquina A. Pero la máquina así construida estará en blanco, ya que le falta el programa que la haga funcionar.

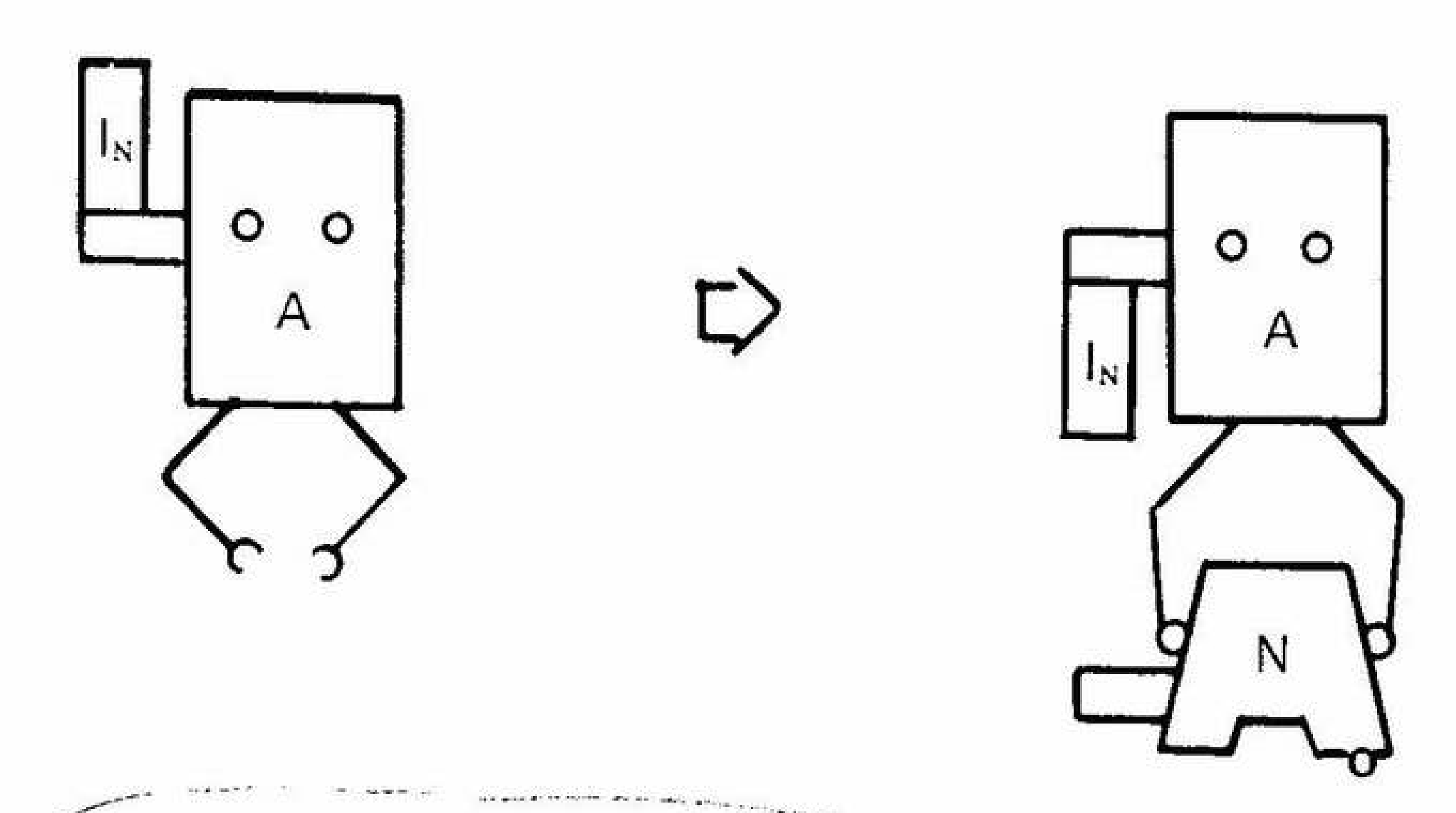


Fig. 24. *Las máquinas de Von Neumann.* El constructor universal A, encargado de un programa I_N de construcción de otra máquina N, va a leer el programa y, obedeciendo las instrucciones, va a construir pieza a pieza, por medio de los materiales disponibles en su entorno, una copia de la máquina N, representada en la parte inferior derecha de la figura.

A fin de obtener un máquina completa con su programa, primero es preciso copiar el programa, exactamente como una célula, antes de reproducirse, comienza por copiar el mensaje genético, al objeto de que una copia del mensaje esté presente en la célula hija y que permanezca otra en la célula madre.

Cabe concebir, pues, un sistema más complejo que implique, además del constructor universal A, una máquina B que copie el programa y una máquina C que transfiera la copia del programa a la máquina hija D = A + B + C (fig. 25). La serie de operaciones sería la siguiente:

1. Copia del programa I_D por B (paso de *a* a *b*, fig. 25 *b*).
2. Construcción de una máquina D = A + B + C por el constructor universal A, representado en *c*, fig. 25 *c*).
3. Transferencia del programa I_D a la máquina hija (en *d*, figura 25 *d*).

Esta pequeña maravilla informática, que combina las propiedades de una máquina secuencial programada y de dos máquinas informáticas, obliga a plantearse dos preguntas: 1) ¿Cuál es la dimensión de semejante máquina? y 2) ¿Cuál es su modo de empleo? Comencemos por la segunda pregunta.

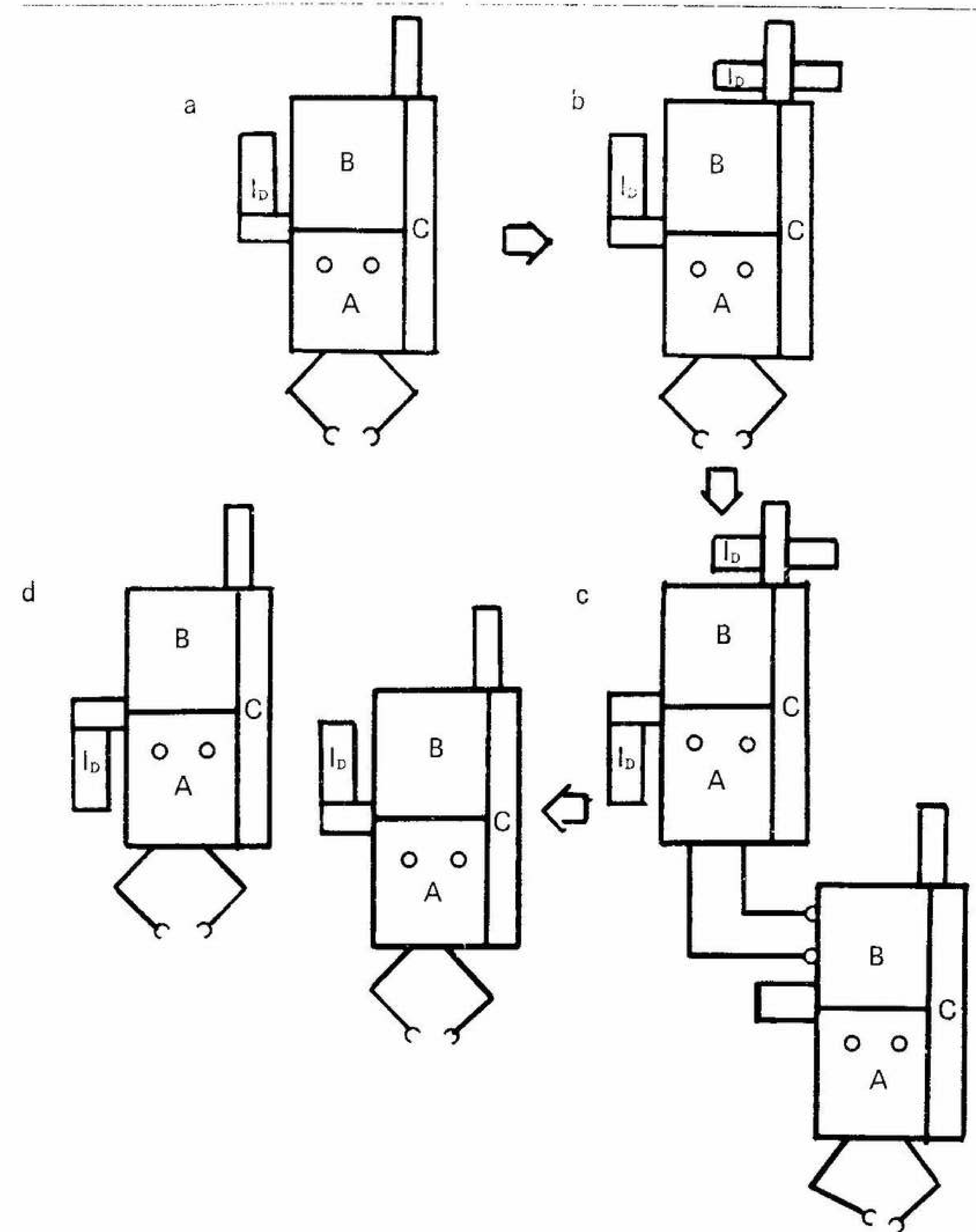


Fig. 25. El constructor universal A es completado por una máquina que copia el programa y una máquina C que transfiere la copia del programa a la máquina hija D = A + B + C. La secuencia de operaciones es:
1) copia del programa I_D por B (paso de *a* a *b*);
2) construcción de una máquina D = A + B + D por el constructor universal y representada en *c*;
3) transferencia del programa I_D a la máquina hija, representado en *d* donde se presentan ahora dos máquinas idénticas.

MODO DE EMPLEO DEL ROBOT

La idea motora (Tipler, 1980) (18) es que una CET hubiese enviado robots para que explorasen los sistemas planetarios vecinos con el fin de encontrar planetas en los que instalar la civilización, si fuese preciso modificando fundamentalmente su clima, lo que podría denominarse una «geopoiesis» (19), y darle el aspecto de la Tierra (lo que los anglosajones denominan *Terraforming*). Un procedimiento semejante evitaría exponer a una expedición galáctica a los riesgo del viaje, a las dificultades de instalación en un planeta inhóspito. En cuanto a la máquina de Von Neumann, su primer cuidado, una vez instalada en un astro adecuado del sistema planetario escogido, sería engendrar una copia que partiese en seguida a la descubierta, mientras que el ejemplar que hubiese permanecido allí haría el trabajo necesario para preparar el recibimiento de la civilización con problemas de crecimiento. Al mismo tiempo avisaría al planeta madre sobre su instalación para que la civilización preparase la marcha de los colonos, a no ser —como sugiere Tipler— que esta civilización fuera tan sabia que la máquina fuera capaz de realizar la síntesis de una célula viva... por ejemplo, la síntesis de un óvulo fecundado. Gould (1985) (20) subraya desde el punto de vista de los biólogos el carácter altamente especulativo de semejante hipótesis.

Unas máquinas tales, que irían de un sitio a otro, terminarían por colonizar toda la Galaxia. El tiempo de duplicación podría ser insignificante ante la duración del viaje para el que es deseable la economía de combustible. De esta forma, con un tiempo de latencia desdeñable en razón de la duración de los desplazamientos, y a una velocidad de sólo 30 kilómetros por segundo, Tipler ve la Galaxia invadida de máquinas de Von Neumann al cabo de 300 millones de años.

Así pues, el silogismo de Tipler es el siguiente:

a) Una especie inteligente desarrollaría necesariamente la tecnología de los viajes intersiderales.

b) La exploración/colonización de la Galaxia se cubriría de manera automática en menos de 300 millones de años.

c) Como en la Tierra no hemos visto (señales en el pasado, visitas en la actualidad) máquinas de Von Neumann, puede concluirse que no existen civilizaciones extraterrestres.

DIMENSIONES, FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT

Pero, ¿es técnicamente concebible la construcción de dichos robots?

Hay dos problemas que se relacionan con las dimensiones de una máquina de Von Neumann, el uno se refiere al programa, el otro a los talleres y a las fábricas.

Sin lugar a dudas la dimensión del programa es inmensa. Sin embargo, partiendo de la capacidad de almacenamiento del cerebro humano, parece que cabe estimar el tiempo necesario para elaborar el programa de una máquina de Von Neumann en treinta hombres/siglo (treinta hombres durante un siglo, o cien durante tres siglos...). Sobre esta base puede sugerirse la hipótesis de que el programa de funcionamiento de una máquina de Von Neumann puede estar escrito de aquí a un siglo. Después de todo, puede considerarse que los seres humanos, en miles de millones de ejemplares, son máquinas de Von Neumann, prueba, si es que las hay, de que la máquina de Von Neumann existe... Ahora bien, ¿es realizable?

¿No peca de optimista la estimación anterior? El programa de la iniciativa de defensa estratégica de Reagan representa 10 millones de líneas y requiere el trabajo de 3.000 hombres durante diez años.

El lugar que ocuparía el programa de una máquina de Von Neumann es probable que sea insignificante frente al instrumental de que la máquina debería disponer para construir las fábricas y los talleres necesarios, desde la extracción de los minerales hasta la fabricación de las piezas y su montaje. Tipler, Drake y otros calculan que toda la parte mecánica pesaría por lo menos 1.000 toneladas (21). Así pues, lo que trata de lanzar al espacio es una carga de unas 1.000 toneladas. La salida podría tener lugar desde un asteroide (lo que economizaría energía) y, teniendo en cuenta el consumo energético de aceleración y frenado, puede calcularse en diez millones de toneladas la masa de salida, cuya mayor parte está constituida por el combustible. La exploración podría realizarse en dos etapas. Unas sondas a gran velocidad irían a buscar el emplazamiento de los planetas habitables o susceptibles de geopoiesis. Fabricarían y lanzarían otras sondas rápidas, en tanto que las máquinas de Von Neumann seguirían a continuación a la velocidad mucho más lenta de 30 kilómetros por segundo. Las sondas rápidas serían propulsadas por medio de sistemas que utilizasen energía nuclear. Admitiendo que la energía nuclear fuese reducida a fines de propulsión, el combustible podría ser el helio ^{3}He, que, empleado en procesos explosivos o en el tipo de fusión controlada, permitiría efectivamente una velocidad del orden de una décima parte de la velocidad de la luz.

Si la velocidad requerida es de 1/10 de la velocidad de la luz para que las máquinas de Von Neumann pueblen la Galaxia en 300 millones de años, los problemas energéticos con que topamos son enormes. En la hipótesis más favorable, para las operaciones de salida y de llegada (sobre asteroides) una máquina de 1.000 toneladas precisaría un millón de toneladas de helio ^{3}He. En el sistema solar, el helio ^{3}He acaso se extrajera de la atmósfera de Júpiter a condición de tratar 10.000 millones de toneladas de gas. La simple extracción de este gas fuera de la atracción de Júpiter costaría cien veces esta masa en combustible químico. La preparación de este combustible nuclear exigiría tanta energía como la que se produce en toda la Tierra en una centuria. ¿Puede una civilización consagrar todas su capacidades durante un siglo a un proyecto cuyo resultado o repercusiones tardarían en manifestarse centenares de años?

LOS ROBOTS PERVERSOS

Sin embargo, hay un cierto número de dificultades que parecen oponerse al funcionamiento infalible de este sistema de robots. Es obvio que el punto débil del sistema reproductor estriba en la parte informática, tanto desde el punto de vista del *material* como del *programa*. Bastaría con un accidente en el curso del proceso de copia del programa para que una máquina informática tan compleja como la que aquí se contempla actuase de manera diferente a la de su progenitor. Harían falta unos 10.000 años para que una máquina de Von Neumann alcanzase otro sistema planetario y produjese, en un tiempo mucho más breve, una copia de sí misma. De vez en cuando esta máquina debería hacer una segunda copia, sin la que sería imposible —en la hipótesis misma de Tipler— invadir en 300 millones de años la Galaxia con máquinas de Von Neumann, ocupando mil millones de planetas habitables. Es necesaria una tasa de crecimiento de alrededor del 0,07 % durante miles de millones de años. Pero tales máquinas podrían continuar reprodu-

ciéndose tras la colonización completa de la Galaxia. Al cabo de otros 300 millones de años, su número sería de mil millones de miles de millones, millones de veces más que el número de estrellas existentes y el canibalismo (22) (Newman y Sagan, 1981) prevalecería en el mundo de los robots, si es que no emprendían un remodelado completo de la Galaxia.

Cabría concebir un programa que prohibiese a un robot atacar a otro robot convenientemente identificado. Existiría, no obstante, la posibilidad de otros accidentes. Todos los computadores poseen memorias electrónicas hechas de diodos de silicio. Cuando hay un número muy elevado de diodos, la radiactividad de los propios materiales puede producir averías: las partículas alfa cambian un 1 almacenado en la memoria por un 0. En la historia de un robot y en su reproducción, ocurren errores de copia; aunque sólo fuera bajo el efecto de los rayos cósmicos, la máquina podría generar una copia imperfecta, xenófoba o incluso paranoica. Estas nuevas copias quizá se equiparasen con medios fantásticos de destrucción y, por ejemplo, podrían tomar como blanco toda fuente no identificada de radiación electromagnética codificada (Brin, 1983) (23). Tanto la ausencia de detección de emisiones codificadas en la Galaxia, como la ausencia de señales de CET sobre la Tierra se debería entonces a la destrucción de estas civilizaciones y de sus sistemas de emisión a causa de máquinas de Von Neumann paranoicas desde el comienzo de su desarrollo, lo que Brin denomina *sondas letales*.

Estas consideraciones tecnológicas sobre las mutaciones de los robots ignoran un hecho bien conocido en biología: la mayor parte de las mutaciones engendran especies inadaptadas tendentes a la desaparición, lo que naturalmente no excluye el seguimiento de una raza de predadores.

El carácter fatal de la aparición de robots perversos parece resultar de un principio termodinámico simple, derivado del segundo principio de la termodinámica. Este segundo principio, al definir un rendimiento máximo, afirma que a partir de dos fuentes de calor no puede haber producción de energía mecánica sin disipación. De la misma forma, no puede haber concepción, fabricación y mantenimiento de sistemas informáticos sin pérdidas irreversibles de energía y, globalmente (sistema y entorno reunidos), producción de entropía (que mide el grado de irreversibilidad del proceso). Cuanto más elaborado y complejo sea el sistema informático, mayores son los gastos de energía y la producción de entropía. La infalibilidad del sistema o, lo que viene a ser lo mismo, una perfecta capacidad de autorreparación o de autocorrección no se obtienen sino por medio de un gasto infinito de energía (24).

A efectos prácticos, este argumento no es irrefutable. En efecto, gracias a una ligera complicación se pueden corregir los errores de la memoria a través de un sistema matemático de control denominado control de paridad (25). Es posible un control del control pero no el corregir los errores del control. Así pues, no es evitable la redundancia que garantiza casi con seguridad (pero sólo *casi*) la conservación del algoritmo. Hemos visto que la redundancia es una característica de los seres vivos. Sin embargo, no evita los errores de copia ni los malos funcionamientos.

El reconocimiento del carácter fatal del desajuste perverso de las máquinas de Von Neumann difícilmente escaparía a una CET capaz de construir semejantes máquinas. Se para entonces en la contradicción siguiente:

— Una civilización extraterrestre desarrolla de manera indefectible (?) la técnica de los viajes intersiderales.

— Eso la lleva a emprender la exploración de la Galaxia por medio de máquinas autorreproductoras (máquinas de Von Neumann) cuya complejidad sería comparable a la del cerebro humano.

— Emprende esta exploración pese a las restricciones termodinámicas de mantenimiento de los robots durante un período de 300 millones a 1.000 millones de años (¡riesgos de aparición de robots perversos!).

La hipótesis de la exploración de la Galaxia por máquinas de Von Neumann ha sido formulada por Tipler con el propósito de mostrar mediante un razonamiento reducido al absurdo que sólo nosotros estamos en el Universo. ¿No cabe pensar que la tesis solipsista no queda reforzada por este razonamiento?

SOCIOLOGÍA

Según acabamos de ver, los razonamientos precedentes hacen intervenir muy pronto una sociología y una psicología de los extraterrestres. En definitiva, las hipótesis realizadas se basan en los

comportamientos humanos o en los sueños y deseos de la humanidad, tal como los cuentos (modo arcaico) y los relatos de ciencia ficción (modo moderno) los exponen, y tal como las utopías, de modo consciente, los utilizan para componer el tejido de la sociedad futura. Incluso admitiendo que las hipótesis de partida sean válidas, tales razonamientos a duras penas están a cubierto de faltas lógicas. Es lo que vamos a examinar a continuación.

DURACIÓN DE LA EMPRESA GALÁCTICA

Se trate de la emisión de señales ópticas o de radio, del envío de colonos o de robots, no hay posibilidad de consegir el contacto si no es continuando la empresa por espacios de tiempo dilatados.

¿Pueden concebirse empresas que movilicen un parte considerable de las fuerzas humanas (saber, saber-hacer, energía) durante intervalos de tiempo que pueden alcanzar varios centenares de veces la duración actual de la vida humana?

Una especie inteligente que goce de una expectativa de vida mucho mayor que la nuestra podría emprender experiencias de muy larga duración confiando en recoger los resultados en una misma generación. Pero ¿son compatibles las especies de una gran longevidad con un proceso evolutivo que exige la sucesión de un número alto de generaciones?

¿La longevidad es la única forma de contemplar la posibilidad de empresas de larga duración? La construcción de Notre-Dame de París duró casi 200 años y la historia cuenta con muchos otros monumentos que no pudieron terminarse más que en varias generaciones, como la Gran Muralla china, cuya construcción se prolongó doce siglos. Sería admisible que una fuerte motivación permitiera ejecutar empresas a muy largo plazo. El principio de convergencia conduce entonces a admitir el carácter necesario de una empresa a largo plazo, del tipo de la exploración o de la colonización de la Galaxia. Pero esta hipótesis explícita descansa sobre un buen número de hipótesis implícitas.

Aunque el sueño de una aventura así se halle en el seno de numerosos relatos de ciencia ficción, estamos, sin embargo, lejos todavía de poder hacer que trascienda a la realidad. Admitir que este deseo va a proseguir es admitir que las generaciones futuras tendrán las necesidades y las motivaciones de los que sienten este deseo en la actualidad. ¿Es verosímil que el único gran proyecto al que deba consagrarse una especie humana políticamente unificada, que viva en paz sobre la Tierra, sea la exploración y la conquista galáctica? Los proyectos galácticos tienen una escala temporal de centenares, de millares o incluso de millones de años. En el caso de la especie humana, admitir que estos proyectos vayan a ser proseguidos con constancia, ¿no es ignorar los procesos evolutivos y la aceleración del movimiento de la sociedad que ya posee una escala de tiempo inferior a una generación?

DURACIÓN DE UNA CIVILIZACIÓN

En el cálculo del número de civilizaciones,

$$C = p\ t_C$$

ya es muy incierta la tasa p de surgimiento de una civilización avanzada en la Galaxia: el 0,0005 por año parece verosímil, pero no se excluye un número mucho menor. La duración t_C de esta civilización tecnológica avanzada es aún más incierta: ¿Mil o mil millones de años?

La respuesta a esta pregunta es por entero especulativa. Todos los intentos de respuesta se basan en un análisis del comportamiento animal y de la historia de la humanidad. En efecto, lo que más sorprende en el mundo animal o en las sociedades humanas son los fenómenos de crecimiento, de lucha por la vida y de formación o de agotamiento de recursos.

Se sabe cómo tratar matemáticamente el problema de la lucha por la vida en casos simples. La función de los predadores en las variaciones de una población ya fue descrito por Volterra, que dio soluciones muy representativas de los datos de observación. Cuando el predador ha destruido casi por completo la población de la que se alimenta, su propio número decrece por falta de recursos, mientras que la otra especie puede multiplicarse de nuevo.

En la descripción antes realizada del modo como se propaga una onda de civilización, se ha supuesto de forma explícita que, debido a un efecto de saturación, la tasa de crecimiento tendía hacia cero cuando la población alcanzaba cierto límite.

Como representación matemática que es —que describe la naturaleza matemática del fenómeno—, este modelo nada dice sobre cómo se detiene el crecimiento. La destrucción o la limitación de los recursos es la causa más clara y más evidente en el mundo ani-

mal, pero la especie humana posee otros medios de limitar la población, por lo menos con la misma eficacia: la guerra, en segudo lugar la introducción de usos, normas y, por último, de una política de control del crecimiento.

Las reflexiones sobre la vida t_C de una civilización o sobre el progreso de una civilización durante enormes intervalos de tiempo reflejan claramente las opciones ideológicas o, en el sentido amplio del término, políticas.

Ciertas comparaciones dejan perplejo. Observa Brin (26) que desde más o menos el 1500 antes de nuestra era hasta el 800 de la misma, los polinesios se instalaron en el Pacífico navegando de isla en isla. Las culturas polinesias han estado sometidas a ciclos regulares de extrema superpoblación, controlada por sangrientas ejecuciones de la población masculina adulta por medio de guerras o de ceremonias rituales. En numerosos relatos, los hombres de determinadas islas han sido suprimidos casi por completo, como consecuencia de querellas internas o de la invasión de hombres provenientes de otras islas. En ciertos casos el transporte de animales domésticos y de parásitos ha trastornado el ecosistema.

La tentación de comparar el salto de planeta en planeta con el salto de isla en isla ha llevado a plantearse la cuestión del destino de las poblaciones en el interior del frente colonizador en expansión, allí donde se ha instalado la civilización. Ante la imposibilidad de controlar el crecimiento, las poblaciones podrían ser presa de luchas sin piedad por los recursos naturales.

Hemos visto que es imposible resolver los problemas planteados por el crecimiento en progresión geométrica. En presencia de tamaño crecimiento, en el interior de cada sistema planetario se habría producido una lucha implacable para hacerse con los recursos. Estas luchas cruentas vendrían a limitar automáticamente la duración t_C de las civilizaciones extraterrestres. Esta visión catastrofista ya la conocemos. La destrucción de las civilizaciones tecnológicas avanzadas al cabo de una breve duración responde a la vieja tradición del Juicio Final, con la diferencia de que en este caso la humanidad, al ser toda ella culpable, va a ser destruida por completo.

Sin embargo, si esta hipótesis no resulta inevitable, no lo es el carácter automático de la autodestrucción. C. Sagan, por ejemplo, concibe un control total de la población y de los recursos. De hecho, esta visión de las civilizaciones extraterrestres es la proyección sobre el Universo de una visión utópica cuyas raíces se encuentran en las sociedades meticulosamente organizadas del tipo de la *Utopía*, de Moro, o de la *Ciudad del Sol*, de Campanella. En la edad del desarrollo científico y técnico, la humanidad ha sobrepasado la etapa de la práctica y de la consecución de objetivos por medio de pruebas de ensayo y error. El tema del progreso está presente en todas las utopías, desde *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain*, de Condorcet (1795). Esta misma obra se inspira en la *Nueva Atlántida* de F. Bacon (1627), que describe una sociedad en la que la investigación científica desempeña una función capital en el desarrollo. Según ha quedado dicho, parece que la noción moderna de evolución en el sentido de un progreso ilimitado se debe a Spencer (1852) (27). Se diría que esta noción impregna el pensamiento de un gran número de teóricos de las CET. Examinemos más de cerca su significado.

Desde el punto de vista de la teoría del conocimiento, en el terreno de las ciencias de la naturaleza la humanidad ha alcanzado la etapa de la representación. Como ya se ha señalado con amplitud en la primera parte, accedemos al conocimiento de las leyes de los procesos naturales. Este conocimiento de las leyes de los procesos naturales nos ha permitido la creación de una multitud de instrumentos nuevos, a los que no conduce la sola práctica. Un destacado ejemplo es el dominio de los semiconductores y la construcción de los computadores. Más recientemente, la ingeniería genética abre otras perspectivas sobre el control del mundo biológico.

Se ha franqueado muy pronto el paso entre el control del mundo físico y la idea del control de la sociedad. Al igual que se alcanza el conocimiento de las leyes de la naturaleza, ¿no pueden las ciencias del hombre llevar al conocimiento de las leyes que gobiernan la especie humana y su sociedad? Aún no hemos llegado a ese punto y sí conocemos cómo la pretensión de detener la verdad sobre las leyes de la sociedad ha servido y sirve todavía en el presente para justificar un poder opresor. Nuestra ignorancia, en realidad, es inmensa y tal vez sea imposible el salto desde las leyes de la naturaleza a las de la sociedad, en la medida en la que la noción de objetividad, fundamental cuando se trata de las leyes de la naturaleza, debe reconsiderarse cuando el hombre es a la vez sujeto y objeto.

Esta reflexión y estas observaciones no sirven más que para atraer la atención sobre un problema esencial. ¿Es posible, por naturaleza, controlar el crecimiento? Quizá lo sea limitar el número de nacimientos a través de una incitación psicológica, o fiscal, y por la introducción de medios anticonceptivos de uso fácil y sin riesgos. Pero el crecimiento no es únicamente crecimiento numérico, es de-

cir. crecimiento del número de individuos. El crecimiento es también el aumento del consumo de recursos por habitante, se trate de energía o de los productos del gasto de energía. Suponiendo que el principal consumo por habitante sea el de la información, hemos observado ya (a propósito de las máquinas de Von Neumann) que la producción informativa va acompañada, por otra parte, de producción de energía, es decir, de consumo de energía. Este crecimiento también tiene un límite. Así pues, es posible especular sobre esta idea de que una sociedad tecnológica avanzada que escapa a la autodestrucción alcanza un completo control de su desarrollo, de su cultura, de su entorno, de su crecimiento y asume que, en cierto sentido, cambia de naturaleza, lo que F. Meyer (1974) denomina el fin de la historia.

En resumen, la duración de la vida t_C de una civilización viene fijada por el modelo evolutivo de la sociedad en que se desarrolla: catástrofe o estado estacionario. Está claro que las reflexiones deben continuar más allá de este punto: o bien una civilización tecnológica no cambia de naturaleza y es destruida, o cambia de naturaleza y su duración es muy larga. Parece natural admitir que la civilización cambia de naturaleza, pero entonces, ¿cuál es su naturaleza?

UN POCO DE FICCIÓN

¿A qué pueden dedicarse los individuos pertenecientes a una civilización tecnológicamente avanzada y muy antigua? A esta pregunta, los autores más serios han dado respuestas que, de hecho, son préstamos de las autopías y de los mitos.

El control del crecimiento, el dominio de la naturaleza, el envejecimiento vencido sugieren una civilización cuyos ciudadanos se consagrarían de modo principal al disfrute de la meditación, bajo una forma inconcebible para nosotros. Papagiannis (1984) (28) prevé una elevación a un nivel de espiritualidad tal que las especies que hayan alcanzado este grado evolutivo podrían comunicarse directamente con su creador. En esta cosmología, la creación del mundo ha sido realizada por el creador con el fin de llegar al cabo de varios miles de millones de años a una conversación entre Dios y sus criaturas.

La admiración de ciertos científicos ante una evolución del Universo que conduce a la aparición de la vida sobre la Tierra recuerda un tanto la admiración de Bernardin de Saint-Pierre y lleva a concepciones causales que poseen la misma simplicidad (el melón se divide en rajas para poder ser comido en familia...).

Lo sustancial de estas concepciones descansa en un análisis de las cuatro fuerzas de la naturaleza (pág. 26 y apéndice A1). Habría bastado con que las constantes fundamentales que fijan la magnitud de estas fuerzas hubiesen sido ligeramente distintas para imposibilitar la aparición de la vida. Por ejemplo, si las interacciones fuertes fuesen un poco menos intensas, la combustión del hidrógeno no se produciría en las estrellas, sólo la contracción gravitatoria sería fuente de una radiación de escasa duración y la producción de elementos pesados sería imposible. Una constante gravitatoria más fuerte daría un modo de evolución de las estrellas incompatible con las restricciones sobre la aparición de la vida. De manera general, no hay necesidad de cambiar mucho el valor de las constantes fundamentales para configurar un universo en el que la vida no habría nacido jamás, se tratase de los plazos necesarios de la evolución estelar o de las temperaturas en la superficie de los planetas sólidos. *El principio antrópico,* enunciado por Carter (1974) (29), afirma que las constantes fundamentales tienen el valor que tienen porque han permitido la aparición del hombre. Dyson (30) va más lejos al afirmar que «la notable armonía entre la estructura del Universo y las necesidades de la vida y de la inteligencia es una manifestación de la importancia del espíritu en el orden de las cosas».

No hay más que dar un paso para declarar que Dios ha elegido las constantes fundamentales para que aparezcan la vida y la especie humana. El principio antrópico ha sido adoptado cómodamente por Papagiannis puesto que reúne el alfa y omega, la divina providencia en la elección de las constantes fundamentales para el momento de la formación del Universo y la comunicación última del hombre con su Creador.

Entre aquellos que pueden denominarse humanistas o racionalistas, corre el mito del progreso indefinido. Es éste el que nos deja considerar un control completo del crecimiento y de la colonización, el que lleva a descartar los argumentos del tipo «guerra de las galaxias», al no poder entrar en contacto las civilizaciones sino cuando están muy evolucionadas y cuando son capaces de controlar ese contacto. Ya hemos indicado que las fuentes de estas ideas sobre la ciudad ideal se encuentran en las obras de los humanistas del Siglo de las Luces y han sido enunciadas bajo otra forma en el siglo XIX. H. G. Wells, en *Una utopía moderna* (1905) (31), recha-

za las utopías tradicionales en las que seres humanos sin personalidad ni relieve viven en las más perfectas felicidad y beatitud. Para H. G. Wells, la sociedad utópica es una sociedad en evolución constante, la utopía es dinámica. Forma moderna de la sociedad de la *Nueva Atlántida* de F. Bacon, la sociedad que Wells describe, en *Men like Gods* (1923), tiene como objetivo explícito la conquista del saber. La infinita complejidad de la naturaleza hace esperar que a una especie inteligente le ocupe un tiempo infinito el conocer el Universo: «Ante nosotros se extiende el saber hasta perderse de vista y podemos adquirirlo y adquirirlo sin cesar; a medida que lo adquirimos, él se multiplica...» La producción de saber no es de modo necesario una producción divergente de información. A menudo se ha visto cómo un saber empírico complejo se reduce a leyes fundamentales simples. La repetición de esta forma de contracción del saber permite advertir que, a pesar de los problemas de producción de entropía asociada con la producción informativa, la adquisición del saber por parte de una especie inteligente carece de límites.

La visión catastrofista, se trate de la muerte nuclear, de los robots perversos o de las matanzas de colonias superpobladas, sugiere a Baal Hammon los sacrificios humanos, destinados a congraciarse con los dioses o, como hemos dicho más arriba, el Juicio de Dios sobre las fuerzas del mal.

Cada una de estas visiones lleva a una explicación de la ausencia de contacto con las CET.

A cada uno su verdad.

NOTA FINAL

OBSERVACIONES CRÍTICAS

He querido presentar aquí un estudio racional de las concepciones recientes sobre la vida y las civilizaciones en el Universo. No se ha hecho tentativa alguna de ser exhaustivo y será fácil descubrir lagunas importantes en este libro. En particular, no he tratado de describir en detalle los programas del tipo SETI (Investigación sobre las Inteligencias ExtraTerrestres). En contraposición, lo que sí he tratado de presentar de manera coherente es lo que se me antojaba más relevante y significativo.

La producción de moléculas levógiras bajo el efecto de la rotura de simetría de las interacciones débiles parece ejemplar a este respecto. Combina las profundas ideas de P. Curie sobre la simetría de las causas y las teorías más modernas sobre las bifurcaciones.

El principio de convergencia lleva a admitir que la aparición de la vida, de la inteligencia y de la civilización estadísticamente es inevitable. Pero lo que es cierto estadísticamente no permite certeza alguna cuando se trabaja con pequeñas muestras. Admitiendo que la estimación estadística sea justa, tal vez no haya más que algunas decenas de civilizaciones que vivan en el presente en nuestra Galaxia, todo lo más algunos millares.

Las especulaciones sobre los contactos con las civilizaciones extraterrestres, posibles o imposibles, se han abordado de forma lógica, pero la lógica es difícil de seguir hasta el fin. Algunas de las diversas hipótesis que se han propuesto para explicar la ausencia de contacto han sido descartadas deliberadamente en razón de su carácter insólito (1).

Admitir la existencia de leyes generales debe ser el hilo conductor de toda investigación en este terreno. Pero la existencia de leyes no impide los accidentes estadísticos.

No ser antropomórfico es de una dificultad extrema. He tratado de no serlo pero no sé si es posible.

Por mi parte terminaría de buena gana afirmando que la ausencia de contacto se debe, sin más, a la extrema dificultad material de establecerlo, se trate del umbral de detección o de la duración de la observación necesaria.

La ausencia de prueba no es la prueba de la ausencia, y esto vale para visitantes provenientes del Cosmos y para señales llegadas desde el fondo del cielo. Hay muchos fenómenos astrofísicos inexplicados. Por razones de escala, de cantidad de energía, no pueden tomarse como manifestación de civilizaciones extraterrestres. Puede ser sencillamente que no observamos el cielo con los instrumentos adecuados, o en la dirección debida, o en el momento preciso, ni desde el tiempo necesario. Las consecuencias del descubrimiento de civilizaciones extraterrestres serían de una inmensa importancia; el simple descubrimiento de la vida extraterrestre podría alterar por completo nuestras ideas sobre sus orígenes. Teniendo en cuenta el hecho de que la aparición de la vida es mucho más probable que la aparición de una civilización tecnológicamente avanzada, la presencia de la vida extraterrestre goza de una probabilidad mucho mayor. ¿A qué distancia de nosotros? ¿A 15 años-luz?

A este respecto, todo proyecto que permita conocer algo mejor el Universo, la investigación sobre las inteligencias extraterrestres (el proyecto SETI de los Estados Unidos), el proyecto de comunicación con las inteligencias extraterrestres (el CETI de la Unión Soviética), o el proyecto mucho más laborioso de realizar —pero tal vez con más seguridad que aportar en los resultados— de investigación sobre la vida, incluso del tipo más primitivo, merecen ser tomados seriamente en consideración.

Más allá del sistema solar, en alguna parte de la Galaxia, ¿hay una vida que se desarrolla, una civilización que se despierta? Acaso esta pregunta sea respondida en los años venideros. Todavía están por venir las grandes modificaciones de nuestros conocimientos; ¿es posible librarse del desarrollo ilimitado del saber?

Al término de estas reflexiones, me permito dar aquí las gracias a:

— Yves Galifret y Gabriel Gohau por sus explicaciones del principio de convergencia; a Patrick Pajot por haber puesto en orden las páginas de biología molecular (que se tomó la molestia de volver a escribir); a Carolyn Merchant por su referencia al *Somnium* de Kepler.

— A todos aquellos, editor incluido, que en la función de confiados lectores o lectoras han puesto en mi conocimiento textos resumidos, términos de jerga especializada, y otras faltas de estilo y organización del manuscrito cuya corrección era indispensable para que el libro fuera legible (o, al menos, eso es lo que espero).

APÉNDICES

A1. LAS CUATRO FUERZAS DE LA NATURALEZA

En el corazón del núcleo del átomo yace uno de los niveles profundos de la naturaleza. El estudio del núcleo nos ha revelado la presencia de fenómenos cuyo origen se debe a la presencia de niveles todavía más profundos, de los cuales sólo algunos son comprensibles.

Las fuerzas de la gravitación regulan los majestuosos movimientos de los planetas, de las estrellas, de las galaxias; las fuerzas electromagnéticas fijan la estructura de los átomos y la producción de luz. Vamos a ver cómo se nos revelan otras dos fuerzas: las interacciones «fuertes» y las interacciones «débiles», y vamos a mostrar que, al igual que las otras dos, éstas se manifiestan en todo el Universo.

Hemos hecho mención de las reservas de energía contenidas en los núcleos de los átomos. Portadores principales de la masa, los núcleos de los átomos son constituyentes esenciales del Universo. La propia presencia de los átomos, es decir, la propia presencia de los núcleos en todos los puntos del Universo, posee una significación profunda: en la marca significativa de una propiedad de la materia cuya universalidad constituye uno de los lazos fundamentales entre lo infinitamente grande (el Cosmos) y lo infinitamente pequeño.

Para comprender este lazo es preciso penetrar en el núcleo a fin de comprender su estructura y averiguar lo que constituye su cohesión. «Penetrar» es una metáfora, un término que representa una imagen, ya que esta «penetración» no se realiza más que a través

de la interpretación coherente de una ingente masa de datos experimentales. Hay diversas formas de «penetrar» en el núcleo, como si fuera una morada cuyas entradas hay que descubrir para entrar en ella, de grado o por fuerza.

Hacía ya tiempo que se sabía que los átomos estaban constituidos de electrones, portadores de cargas negativas, retenidos por una carga positiva igual, cuando Rutherford evidenció que toda esta carga positiva, portadora del 99,95 % de la masa, estaba agrupada en el centro, esto es, en el núcleo. En cierto modo, los electrones son la pulpa tierna y jugosa del melocotón, y el núcleo es eso, el núcleo, el hueso de la fruta.

Comenzamos, pues, por observar el núcleo desde el exterior, y para eso vamos a pesarlo. Sin entrar en minucias técnicas, diremos que los físicos construyeron un ingenioso aparato de clasificación de los átomos según su masa. Se observó entonces que las especies químicas naturales eran en realidad mezclas. Por ejemplo, existen tres oxígenos, químicamente idénticos, pero cuyos núcleos poseen masas diferentes. La constitución de estas diferentes especies se clarificó con el descubrimiento experimental de una partícula neutra, el neutrón (Chadwick, 1932). Si se considera la masa del átomo de hidrógeno por unidad, se observa que las masas de los diferentes núcleos son poco diferentes de los números enteros. Se admitió en seguida que estos núcleos diferentes están formados por un número entero de partículas: unas, neutras (los neutrones); otras, con carga (los protones). Por ejemplo, la variedad de oxígeno que se denomina «oxígeno 16» está constituida por 8 protones y 8 neutrones; la variedad que se denomina «oxígeno 17» está constituida por 8 protones y 9 neutrones; la variedad que se denomina «oxígeno 18» está constituida por 8 protones y 10 neutrones.

El hecho de que las masas, una vez medidas con precisión, no vengan dadas por números enteros, plantea problemas.

En química se está acostumbrado a que la masa de una molécula sea igual a la suma de las masas de los átomos que la forman. Aquí la situación es distinta. En química nuclear, la masa del núcleo del átomo es inferior a la suma de las masas de los protones y de los neutrones que lo forman.

La igualdad $E = m\,c^2$ de Einstein entre masa y energía permite comprender la significación de estas diferencias de masa. Nos hace suponer que hay una energía en acción y esto es lo que vamos a examinar.

ENERGÍA DE ENLACE

La Fontaine (*Fábulas* II, 13) se burla del astrológo que ha caído al fondo de un pozo y al que nadie viene a socorrer. He aquí cómo nuestro astrólogo está ligado al pozo, no porque esté atado con una cuerda, sino porque, por involuntario que sea, existe ciertamente un enlace. Para hacerle salir del pozo se le facilita una escala por la que ascenderá paso a paso o bien se le sube mediante un torno.

Y ya tenemos a nuestro astrólogo liberado. Sobre un suelo horizontal, en presencia de la gravitación terrestre, conviene decir que nuestro astrólogo posee una energía nula. Puesto que se le ha suministrado energía para hacerle salir del pozo, si dirá que en el fondo del pozo él poseía, debido a la gravedad, una energía negativa. Esta energía negativa es la que mantenía al astrólogo ligado al fondo del pozo. A la relación del astrólogo con el pozo se le llama *energía de enlace*.

Todo enlace se traduce por una energía negativa, a condición, desde luego, de declarar que la libertad se corresponde con una energía positiva o nula. Si los salvadores de nuestro astrólogo se empeñaran un poco demasiado en su labor, el astrólogo, proyectado fuera del pozo con una energía positiva que le permitiría describir una parábola por encima del brocal, podría hasta romperse un miembro al caer...

Es la relación $E = m\,c^2$ la que nos deja calcular en masa el precio de la libertad o la deuda del enlace.

Si combinamos carbono y oxígeno para lograr dióxido de carbono (es muy fácil, ocurre en cualquier tipo de fuego), obtenemos calor, es decir energía. Esta energía se produce por la reunión del carbono y del oxígeno y, en razón de la ley de la conservación de la energía, el calor que obtenemos (energía positiva) es compensado por una cantidad igual de energía negativa *en* la molécula, la energía de enlace de un átomo de carbono y dos de oxígeno. Expresado en masa, esta energía de enlace es muy pequeña: en la combustión de 12 toneladas de carbono, 4,5 miligramos pasan a calor y representan la diferencia de masa entre los productos iniciales y el producto final.

En el caso de los núcleos, las energías de enlace son mucho mayores que en el caso de la química atómica y molecular; esta diferencia de masa es fácilmente mensurable, y cuando se mide se determina la energía de enlace de las partículas en el núcleo.

La química nuclear permite imaginar las reacciones de cuatro protones que se reúnen para formar un núcleo de helio. Sin entrar en el detalle de las reacciones que conducen al helio, puede hacerse el balance de la transformación. Con una tonelada de hidrógeno se fabrican alrededor de 993 kilogramos de helio. Los 7 kilogramos que se han perdido se convirtieron en calor. El balance total respeta la ley de conservación de la energía.

Si se emplea la imagen de un edificio, los protones y los neutrones se comparan a ladrillos que se mantienen juntos por medio de una especie de cemento o, si se prefiere, por la acción de una fuerza de un tipo particular. Si la gravitación mantiene a la Tierra en su órbita en torno al Sol, si la carga eléctrica que actúa con arreglo a la ley de Coulomb mantiene a los electrones alrededor del núcleo, existe una fuerza que mantiene en los núcleos a los protones y a los neutrones. Esta fuerza ha de ser especialmente poderosa para impedir que los protones, con carga positiva y repeliéndose según la ley de Coulomb, se alejen los unos de los otros.

Esta atracción tan eficaz ha recibido el nombre de *interacción fuerte*. Nos hallamos, pues, en presencia de tres tipos de interacciones: la *atracción de las masas,* que sigue la ley de Newton, la *atracción* o la *repulsión de las cargas eléctricas*, que siguen la ley de Coulomb, y la *interacción fuerte* entre las partículas constitutivas del núcleo (protones, neutrones). Pero el camino del descubrimiento no se detiene aquí.

Radiactividad: el neutrino

En esta primera parte de nuestro examen hemos observado el edificio del núcleo desde el exterior. Antes de penetrar en él podemos observar lo que sale al exterior. Desde luego no es sencillo continuar la analogía con una vivienda puesto que, cada vez que sale algo del núcleo, éste se transforma en otro núcleo. Cuando está realizado el balance, lo que nos aporta, como toda contabilidad, es un conjunto de resultados esenciales.

Desde el descubrimiento de la radiactividad por Becquerel (1896) y su estudio por Pierre y Marie Curie, los físicos se dieron cuenta de que en una de las formas de transformación de los núcleos se emitían electrones. Por razones históricas, esta transformación recibió el nombre de *radiactividad beta*. Ahora bien, una vez que se efectuaron medidas lo bastante precisas, al realizar el balance se observó que la energía que se llevaban los electrones era inferior a la energía disponible. Parecía haberse violado la ley de la conservación de la energía. Las explicaciones posibles eran: o bien la ley de la conservación de la energía no se aplica respecto al núcleo del átomo, o bien una partícula invisible o muy difícil de detectar consume la energía que falta.

La ley de conservación de la energía, en razón de la coherencia extraordinaria que otorga a toda la física, no podía abandonarse de golpe por un caso singular en medio de otros miles. Prevaleció la hipótesis de una partícula nueva. Al no llevar carga eléctrica, al carecer, como parece, de masa, recibió el nombre de bautismo que le dio Fermi, *neutrino*, es decir, pequeña partícula neutra.

El ballet de las partículas elementales se completaba con una partícula nueva, se contaba así con protón, neutrón, electrón y neutrino. La danza de las partículas se hacía más armoniosa y cohesionada. Todas giran en torno a sí mismas y sus movimientos de rotación se completan, se suman o se restan. Con una contabilidad apropiada referida a la rotación de las partículas, el balance es satisfactorio. La ley de conservación de la energía no queda violada y, además, se cumple otra ley de conservación relativa a las propiedades de rotación.

Quedaba por encontrar experimentalmente el neutrino. Esto es lo que consiguieron Cowan y Reines en una célebre y monumental experiencia llevada a cabo en 1956.

La dificultad de atrapar en vuelo a los neutrinos es desmesurada: esto se debe a que el neutrino no interacciona con las demás partículas más que a una distancia muy pequeña y muy poco. Se trata de una interacción diferente de las tres anteriores. Se le ha dado el nombre de «interacción débil».

En el Sol, la transformación del hidrógeno en helio se acompaña con la producción de neutrinos. Éstos fueron detectados por Davis a 1.500 metros de profundidad en la mina de oro de Homestake, en Lead, en Dakota del Sur, Estados Unidos. Se excavó allí una enorme cámara para construir un depósito de 600 metros cúbicos, que se llenó de un compuesto químico rico en cloro. Cuando un núcleo de cloro captura un neutrino, se transforma en argón radiactivo. Este argón se extrae del depósito para medir su radiactividad. De aquí se deduce el número de neutrinos procedentes del Sol.

¿Por qué ocultarse bajo tierra de esta forma? Los neutrinos atraviesan la Tierra casi sin verla. Para contar los que se capturan, es

preciso descontar con cuidado los acontecimientos parásitos. En efecto, se cuenta un número muy escaso de capturas de neutrinos, unos 20 por día para todo el volumen del depósito de R. Davis. El número de neutrinos que llegan a la Tierra es de 100.000 millones por centímetro cuadrado y por segundo.

No vamos a discutir aquí lo pormenores de la interpretación de la experiencia de Davis. Es una cuestión de especialistas. Lo que aquí importa observar es la presencia de neutrinos provenientes del Sol, lo que nos prueba que las *interacciones débiles* desempeñan un papel tanto en el corazón de las estrellas como en las experiencias terrestres (1).

LA GRAN UNIFICACIÓN

Los esfuerzos de los físicos para reunir en una sola teoría la gravitación, el electromagnetismo, las interacciones débiles y las interacciones fuertes deberían conducir a lo que se denomina *gran unificación*.

A2. LA FÍSICA DE LA EXPANSIÓN Y LA RADIACIÓN DEL FONDO DEL CIELO

LA FÍSICA DE LA EXPANSIÓN

Lo sustancial del problema de la expansión se encuentra en la expansión universal.

De tal forma estamos habituados a la atracción terrestre que la caída de los cuerpos nos parece un fenómeno perfectamente natural. Incluso antes de la formulación cuantitativa de la ley de la atracción universal por Newton (*Principia*, 1687), la relación entre la fuerza de atracción y la dimensión de los cuerpos era reconocida por Kepler (el *Sueño* [*Somnium*] de Kepler, obra póstuma, 1634) y presentada como algo ya establecido por Cyrano de Bergerac (*L'autre Monde, les États et Empires de la Lune*, obra póstuma, 1657). En resumen, nos parece natural ver caer la bala lanzada al aire e incluso imaginar que sobre la Luna, más pequeña, la misma bala, lanzada con la misma velocidad, subiría más alto porque sería menos atraída hacia el suelo.

La noción de velocidad de evasión aparece de forma clara con la mecánica newtoniana y se sabe que Julio Verne, en *De la Tierra a la Luna*, dedica amplias explicaciones a este problema. ¿Cómo comunicar a un proyectil la velocidad de 11.200 metros/segundo, o 40.000 kilómetros/hora para que abandone la Tierra? Ciertamente esta velocidad es una velocidad crítica. Si se lanza con una velocidad menor, un proyectil vuelve a caer sin ninguna duda sobre la Tierra. Del mismo modo, para abandonar la Tierra y evadirse a continuación del sistema solar, un proyectil debería ser lanzado con una velocidad en suelo de 43.870 metros/segundo, o sea, casi 160.000 kilómetros/hora. El sistema de cohetes en serie, que es

básico para el lanzamiento de satélites y sondas espaciales, posibilita escalonar el incremento de velocidad y evitar los innumerables problemas que plantea la bala (perdón, Michel Ardan, el obús) de Julio Verne.

La gravitación actúa a distancias colosales y sus signos se registran a escala galáctica y de los sistemas (enjambres de galaxias). El ilimitado alcance de la gravitación implica consecuencias importantes, hasta tal punto importantes que vale la pena considerarlas un momento con atención.

Imaginemos un medio indefinido de una densidad uniforme que cubre todo el espacio. Recortemos en este medio una esfera y alrededor de esta esfera una serie de envolturas concéntricas. ¿Cuál es la influencia de estas envolturas esféricas sobre un punto cualquiera en el interior de la esfera? El asombroso resultado —y contrario a lo que un razonamiento intuitivo podría suponer— es el que sigue. Los efectos de atracción de los diferentes elementos de una capa esférica se compensan de manera exacta, tan perfectamente que un punto interior en una capa esférica no está sometido a fuerza alguna. Este resultado cumple por completo con la ley de Newton, según la cual la fuerza de atracción decrece en sentido inverso al cuadrado de la distancia. Tal decrecimiento se compensa con exactitud por el crecimiento, proporcional al cuadrado de la distancia, de la superficie recortada sobre la capa esférica por un pequeño cono surgido del punto considerado. Para cualquier otra ley de atracción habría un efecto residual, toda vez que no existiría compensación exacta de los dos elementos opuestos.

Pero si se toma un punto situado sobre la esfera así recortada, sufre la atracción de toda la materia localizada en el interior de la esfera. No hay nada que pueda oponerse a esta fuerza, si no son los movimientos de la materia, movimientos de conjunto o movimientos microscópicos. Si los movimientos microscópicos que originan la presión son insuficientes para resistir la fuerza surgida de la atracción newtoniana, la materia de la esfera no puede más que estar en movimiento o ponerse en movimiento.

En una lucubración, un medio uniforme, indefinido, sin presión interior, abandonado al reposo, no podría más que derrumbarse sobre sí mismo. Así puede imaginarse que todas las partes de este medio están a punto de alejarse las unas de las otras. Cualquier esfera en este medio estaría en expansión y el movimiento centrífugo de la materia sería la única forma de oponerse al derrumbamiento. Un medio indefinido, homogéneo, uniforme, que no presente ninguna dirección privilegiada, sin presión interior, puede estar así en estado de dilatación uniforme: la velocidad relativa de dos puntos cualesquiera sería proporcional a su distancia.

Esta notable propiedad de los medios de atracción newtonianos fue descubierta por Seeliger (1895, 1896) y por Neumann (1896). Está en la base de lo que se denomina *Cosmología newtoniana*, por oposición a la *Cosmología relativista*, que toma en cuenta la teoría einsteiniana de la gravitación (1).

Insistamos sobre este punto. La teoría einsteiniana de la gravitación confirma el resultado de la teoría newtoniana. No hay nada que se oponga al derrumbamiento o a la expansión. El resultado de Seeliger y de Neumann se obtuvo casi cincuenta años antes del descubrimiento, por la observación de Hubble y Humason (1927), de la relación entre la velocidad de escape y la distancia. Contrariamente a lo que tanto se ha dicho y escrito, el fenómeno de expansión de un Universo homogéneo, uniforme, isótropo, *no es* una consecuencia de la relatividad general, es una consecuencia de la ley de la gravitación; *ya está presente en los modelos newtonianos del Universo*. Los trabajos de P.J.E. Peebles (1971) (2) establecieron la unión entre cosmología newtoniana y cosmología relativista y mostraron, en razón de la muy débil densidad de la materia, que en el cercano entorno terrestre (aquí *cercano entorno* quiere decir mil millones de *años-luz*) la cosmología newtoniana ya resulta una aproximación excelente. A esta escala, las desigualdades de densidad se suavizan y es válida la hipótesis del medio uniforme.

Lo que, por el contrario, constituye el logro incontestable y específico de la relatividad es la manera en que la luz es sensible a la gravitación. El seguimiento de un haz de luz que se propaga libremente a lo largo de la expansión, nos revela que aquél es sensible al cambio de densidad de la materia, así como que su frecuencia disminuye con el transcurso del tiempo. Se describe la dilatación del Universo con el transcurso del tiempo mediante un factor de expansión R. Este factor, igual a 1 en la época actual, fue menor en el pasado. La distancia entre dos galaxias, igual a d en la época actual, era igual a Rd en la época t, en la que el factor de expansión era R. La luz emitida en una época t, en la que la distancia entre dos galaxias era Rd, tenía la frecuencia f. En una época posterior t' en la que la distancia entre las dos mismas galaxias es R'd (R' mayor que R), la luz tiene la frecuencia f' (f' menor que f):

$$f' \mathrm{R}' = f \mathrm{R}$$

En el modelo de Universo más simple imaginable (compensación exacta de la atracción por el movimiento de expansión) se daría la correspondencia siguiente:

	Época	Factor de expansión
8.700	millones de años	1
3.074		0,5
1.087		0,25
396		0,127
137		0,063
50		0,032
19,7		0,016
6,2		0,008
2,2		0,004
0,778		0,002
0,275		0,001

Se observará inmediatamente una contradicción entre los números de esta tabla y el dato directo de la edad de la Galaxia. Se estima la edad de la Galaxia en 10.000 ó 15.000 millones de años. Con la velocidad de expansión dada más arriba (25 kg/seg/millón de años-luz), el modelo más simple da una edad del Universo (digamos 8.700 millones de años) *inferior* a la edad de la Galaxia. Hay tres hipótesis posibles: 1) La evolución de la edad de la Galaxia es falsa. 2) La velocidad de expansión es menor, inferior a 25 km/seg/millón de años-luz. 3) El Universo es más complicado de lo que podría hacer creer el modelo más simple...

La hipótesis más verosímil es esta última, la cosmología no es una ciencia terminada.

LA RADIACIÓN DEL FONDO DEL CIELO

En 1965, al observar Penzias y Wilson la radiación de radio de unos 7 centímetros de longitud de onda, advierten la presencia de una radiación proveniente de todas las direcciones por igual. Este descubrimiento fue pronto confirmado por numerosas mediciones en otras longitudes de onda. Esta radiación presenta propiedades notables resumidas en el nombre con el que se la denomina: *radiación del cuerpo negro del fondo del cielo*.

La radiación del cuerpo negro es radiación en equilibrio con las paredes de un recinto a la temperatura T. Sus propiedades son definidas por el valor de la temperatura T. Recordemos aquí el decisivo paso dado por Planck (1900), al explicar las propiedades de la radiación del cuerpo negro mediante la hipótesis de los *cuanta*, que otorga a la luz propiedades singulares, las de los fotones, asociadas a sus propiedades ondulatorias. El mecanismo del equilibrio de la radiación con la materia fue elucidado por Einstein (1905) y se debe a Henri Poincaré (1913) una importante demostración: la única formulación matemática posible de las propiedades observadas es la de Planck. La radiación del fondo del cielo es una radiación de cuerpro negro a 2,7° absolutos, es decir, aproximadamente −271° centígrados. Sus propiedades son las de una radiación en equilibrio térmico con la materia a 2,72° K. Pero no existe localmente, ante nuestra vista, materia con la que pueda realizarse el equilibrio. Esto ocasiona una serie de restricciones sobre las condiciones de su producción, y su misma existencia tiene significativas consecuencias para la física del Universo.

Imaginemos por un instante que toda la materia del Universo se distribuye uniformemente en el espacio. Ocurre entonces que las regiones «próximas» a nosotros contienen algo así como 1 protón por metro cúbico. En el mismo volumen, hay unos 500 millones de fotones de la radiación del fondo del cielo. Esta relación de 500 millones a 1 entre el número de fotones y el número de protones tiene una función absolutamente esencial en los modernos desarrollos de las teorías cosmológicas. Se han ofrecido diversas explicaciones sobre su origen, pero ninguna de ellas es de veras satisfactoria.

Tomemos, por el momento, los datos de la observación tales cuales son. Si nos remontamos al pasado, se encuentra un Universo cada vez más contraído. Es imaginable que las galaxias, con sus dimensiones actuales, determinadas por propiedades gravitatorias locales y, por consiguiente, no sujetas a la expansión, han debido tocarse. Si hoy día el factor de expansión tiene el valor 1, esta situación prevalecía en la época en la que el factor de expansión R valía alrededor de 0,01, en la época en la que el Universo tenía una edad de aproximadamente 10 millones de años. En una época aún anterior, las galaxias carecían de existencia propia y esto sitúa el momento de formación de las galaxias. Esta formación de las galaxias es probable que tuviera lugar en el seno de un gas te-

nue (1.000 protones por centímetro cúbico: a título de comparación. la densidad media de la Galaxia en las proximidades del Sol es de 3 protones por centímetro cúbico). en el que las fluctuaciones considerables de densidad condujeron al desmoronamiento gravitatorio de grandes masas gaseosas.

Los fotones de la radiación del fondo del cielo estaban entonces mezclados con el gas, constituido en lo fundamental de hidrógeno. Retrocediendo todavía más en el pasado, damos con una temperatura creciente y, hacia los 3.000°, el hidrógeno se disociaba en electrones libres y protones libres. La época de disociación es crítica, puesto que los electrones libres interaccionan fuertemente con la radiación. Después de R = 0,001 (bajando en el curso del tiempo), los fotones se propagan con libertad; antes de R = 0,001 (edad del Universo: alrededor de 300.000 años), los fotones estaban apresados en la materia.

Cuando se sigue en sentido contrario un rayo luminoso, se remonta el tiempo, ya que, a lo largo de este rayo, se hallan épocas cada vez más atrasadas. Al llegar a las proximidades de los 300.000 años, se encuentra una especie de muro brillante. Estamos rodeados de una vasta esfera de donde surgen, a 3.000° más o menos, los fotones, amortiguados por la expansión del Universo en el transcurso del largo viaje que les ha conducido hasta nosotros.

Remontando todavía más el tiempo, se encuentra en R = 0,003 (edad del Universo: alrededor de 50.000 años) una época en que la energía total contenida en los fotones supera la energía total contenida en los protones; más atrás aún en el tiempo, se encuentra en R = 3 diezmilmillonésimas, en la época en que la edad del Universo es de 1 segundo, una situación en la que la energía de los fotones es comparable con la energía de enlace de los protones y de los neutrones en el núcleo de los átomos.

Dejaremos de retroceder en el tiempo, no porque no sea posible razonar a más distancia, sino sencillamente porque ya no tenemos necesidad de hacerlo en cuanto a nuestra reflexión sobre las civilizaciones extraterrestres. Los movimientos anteriores han sido tratados por S. Weinberg en *Los tres primeros minutos del Universo* (Biblioteca Científica Salvat, n.° 9).

NOTAS

INTRODUCCIÓN

1. Ver, por ejemplo, D. Helfand, «Stellar companion appears to be a giant planet», *Physics Today*, 38, nº 4, abril 1985, p. 19.
2. A. I. Oparin, 1924, Proiskhzhdenie Zhizni, Isd. Muskovskiy Rabochiy. Ver igualmente *R.I.C. Reviews*, 2, 1962, p. 1; *La Science au XXe siècle*, París, Alap, Michel Rouzé ed., 1977, vol. 4, p. 185. *L'Origine de la vie sur Terre*, París, Masson, 1965.
3. S. L. Miller, H. C. Urey, *Science*, 130, 1959, p. 245. Ver igualmente en *Extraterrestrials, where are they?* M. H. Hart y B. Zuckerman ed., Pergamon Press NY, 1982, el artículo de C. Ponnamperuma, p. 87.
4. J. Monod, *Le Hasard et la Nécessité*, París , Éd. du Seuil, 1970.
5. L. Ornstein, «A biologist looks at the numbers», *Physics Today* marzo 1982 p. 27.
6. Lucrecio, *De la nature*, traducción, introducción y notas por Henri Clouard, París, Flammarion, 1964; *De la nature des choses*, selección con prefacio y comentarios de Georges Cogniot, París, Ed. sociales, 1964. El título «De la nature des choses» es la traducción exacta de «de rerum natura».
7. R. Lenoble, *Histoire de l'idée de nature*, París, Albin Michel, 1969.
8. A. Koyré, *Du monde clos à l'Univers infini*, París, PUF, 1952. De hecho, San Agustín en *La ciudad de Dios* (413-426) (XII, cap. 11, 12) empleó toda su autoridad en contra de la pluralidad de mundos. La condenación de 1277 está dirigida contra una interpretación de Aristóteles que limita el poder de Dios (citado por L. W. Beck, «Extraterrestrial intelligent life», *Extraterrestrials*, E. Regis Jr. ed., Cambridge University Press, 1985).
9. El análisis del pensamiento de Giordano Bruno se encuentra en A. Koyré, *op. cit.*, en S. J. Dick, *Plurality of Worlds*, Cambridge University Press, 1984 (edición en rústica).
10. Kepler, *Le rêve de Kepler ou Somnium*, tradución en inglés de P. F. Kirkwood, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1965.
11. Cyrano de Bergerac, *L'Autre Monde*, prefacio y notas de Henri Weber, París, Éd. sociales, 1978.
12. Fontenelle, *Entretiens sur la pluralité des mondes habités*, París, Marcel Didier, 1965.
13. El proyecto de Drake se expone en los artículos siguientes:

F. D. Drake, «Methods of communication», *Interstellar Communications*, C. Ponnamperuma y A. G. W. Cameron ed., Houghton Mifflin Company, Boston, 1974, p. 118.
A. Zuckerman, *Extraterrestrials, where are they?*, *op. cit.*, p. 9.
F. D. Drake, «How can we detect radio transmissions from distant planetary systems», en A. G. W. Cameron ed., *Interstellar Communications*, Nueva York, W. A. Benjamin Inc. 1963, p. 165-167; y «How can we detect radiotransmission from distant planetary systems», *Sky and Telescope*, vol. 19, n.º 3, 1960, p. 140-143.

14. A. Koyré, *op. cit.*
15. *Ibídem*, p. 52.
16. *Ibídem*, p. 108.
17. El lector podrá completar su información con una serie de libros recientes:
H. Reeves, *Patience dans l'azur*, París, Éd. du Seuil, 1981.
C. Sagan, *Cosmos*, París, Mazarine, 1981.
J. C. Pecker, *Clefs pour l'astronomie*, París, Seghers, 1981.
J. C. Pecker, *L'Étoile Soleil*, París, Fayard, 1984.
18. Koyré, *op. cit.*, p. 46.
19. L. Littig, «Affiliation, motivation and belief in extraterrestrials UFO's», *Journal of Social Psychology*, 83, 1971, p. 307, citado por A. Simon, «Psychology and UFO's», The Skeptical Inquierer, vol. 8, n.º 4, 1984, p. 355.
Gerald Heard, *The Riddle of the Flying Saucers*, Carroll y Nicholson ed., Londres, traducido al francés bajo el título *Les Soucoupes volantes*, París, Éditions de Flore, 1951.
Jean Miguères, *J'ai été le cobaye des extraterrestres*, Éditions Promazur, 1979.
La relación entre el aspecto fantástico de las tradiciones populares y los OVNI ha sido destacada por J. Bastide, *Le Mémoire des OVNI*, París, Mercure de France, 1978.
Deben mencionarse tres obras críticas:
P. Schaeffer, *The UFO Verdict*, Buffalo NY, Prometheus Books, 1981.
P. J. Klass, *UFO's explained*, Nueva York, Random House, 1974.
Al igual que la obra ya clásica:
D. H. Menzel y L. G. Boyd, *The World of Flying Saucers*, Nueva York, Doubleday, 1963.
20. F. D. Drake, «Methods of Communication», *op. cit.*

CAPÍTULO I

1. G. Cogniot, *op. cit.*, insiste en este análisis que hace desempeñar un papel fundamental a la escritura en relación con los ideogramas.
2. Ver el artículo de M. Banner, G. Cohen-Tannondji y M. Spiro en *La Recherche*, n.º 154, abril 1984, p. 502, «*La découverte des bosons intermédiaires*».
Los artículos básicos son los siguientes:
S. L. Glashow, *Nucl. Physics*, 22, 1961, p. 579.
S. Weinberg, *Physical Review Letters*, 19, 1967, p. 1264.
A. Salam, Actas del *8th Nobel Symposium 1968*, Almquist and Viksell ed., Estocolmo.
3. Ver la explicación de estos modelos en E. Schatzman, *Origine et Évolution des Mondes*, París, Albin Michel, 1957.
4. R. Lenoble, *op. cit.*
5. Ver la iconografía, por ejemplo, en el *Atlas astronomique* publicado por la *Encyclopaedia universalis*.
6. Ver el artículo de E. Schatzman en *La Radioactivité artificielle à 50 ans*, A. Guinier ed., Éditions de Physique, 1984, p. 69.
7. N. Cabbibo, «L'Unification des forces fondamentales», *La Recherche* n.º 148, oct., 1983, p. 1216.
8. E. Hubble, *The Realm of the Nebulea*, Nueva York, Dover Publications, 1958. Primera edición Yale University Press, 1936.

CAPÍTULO II

1. Esta analogía del efecto Doppler se debe a A. H. Massevitch.
2. C. Infeld, *A. Einstein*, Nueva York, Éd. Revue, 1950. Citado por L. S. Feuer, *Einstein, ou le Conflit des générations*, Bruselas, Ed. Complexes, 1978, p. 111.
3. S. Weinberg, *Les Trois Premières Minutes de l'Univers*, París, Éd. du Seuil, 1978.
4. Cabbibo, *op. cit.*; S. Weinberg, *op. cit.*
5. Se pueden encontrar explicaciones detalladas de estos problemas de datación en *Formation of Planetary Systems*, A. Brahic ed., Editions Cepad, 1982.
6. J. Clavel, *La Recherche*, n.º 152, febrero 1984, p. 254.
Th. Encrenaz, *La Recherche*, n.º 150, diciembre 1983, p. 1597.
7. Ver la iconografía del *Atlas astronomique, op. cit.*
8. La teoría de la aceleración térmica en la superficie de Venus se debe a S. I. Rasool y C. de Bergh, «The runaway greenhouse and the accumulation of CO_2 in the Venus atmosphere», *Nature*, 226, 1970, p. 1057.
9. M. H. Hart, «Habitable zones about main sequence stars», *Icarus*, 37, 1979, p. 351.

CAPÍTULO III

1. Se puede encontrar el análisis del pensamiento de Giordano Bruno en A. Koyré, *Du Monde clos à l'Univers infini*, *op. cit.* y S. J. Dick, *Plurality of Worlds*, Cambridge University Press, Cambridge, 1984 (edición en rústica).
2. Ver el artículo «Amino-acides» de P. Kamoun, *Encyclopaedia universalis*, vol. 1, 1968, p. 936.
3. Ver el artículo «Acides nucléiques» de M. Privat de Garilhe, *Encyclopaedia universalis*, vol. 19, 1971, p. 980.
4. Citado por C. Ponnamperuma, «Cosmochemistry and the origin of life», en *Cosmochemistry and the Origin of Life*, C. Ponnamperuma ed., Reidel 1983, p. 1.
5. Explicación basada en el artículo «Chance and the origin of life», de E. Argyle, *Extraterrestrials where are they? op. cit.* p. 100.
6. Explicación basada en el artículo citado anteriormente en *La Science au XXᵉ siècle*.
7. L. Michel, «Symétrie», *Encyclopaedia universalis*, vol. 7, 1971, p. 630.
M. Gardner, *L'Univers ambidextre*, París, Éd. du Seuil, 1985.
8. K. L. Kowacs, «Beta irradiation may induce stereoselectivity in the crystalliza-

tion of optical isomers». *Origins of Life*. vol. 11. nº 1/2. marzo-junio 1981. p. 37.
9. D. K. Kundepundi y G. W. Nelson. «Chiral Symmetry breaking in non equilibrium systems». *Physical Review Letters*. 50. 1983. p. 1023.
S. F. Mason. «Origins of bio-molecular handedness», *Nature*, 311. 1984. p. 19.
10. M. A. Bouchiat. S. Guina. L. Hunter. L. Pottier. «Observations of a parity violation in Cesium». *Physics Letters*. 117B. 1982. p. 358.
11. R. M. May «The evolution of ecological systems». *Scientific American* 239, septiembre 1978. p. 118.
12. Ver, por ejemplo, S. J. Gould, «SETI and the wisdom of Casey Stengel», *The Flamingo's Smile*, W. W. Norton and Co. ed., 1985. p. 373.
13. C. Sagan. F. D. Drake. *Scientific American*, 232, mayo 1975, p. 80.
14. *Ibídem*.
15. André Leroi-Gourhan, *Le Geste et la Parole*, París, Albin Michel, 1960.
16. *Civilisation. le mot et l'idée*, Centre international de synthèse, ponencias de L. Febure. M. Mauss. A. Niceforo, E. Tonnelat. L. Weber, París, La Renaissance du livre. 1930.
17. L. Weber. *Civilisation, le mot et l'idée, op. cit*.
18. M. Minsky «Why intelligent aliens will be intelligible», *Extraterrestrials*, E. Regis Jr. ed., Cambridge University Press, 1985, p. 117.
19. C. Merchant, *Death of Nature*, San Francisco, Harper and Row, 1980 (edición en rústica, 1982).
20. J. Needham, *La Tradition scientifique chinoise*, París, Hermann, 1974, en especial, el artículo «Les mathématiques et les sciences en Chine et en Occident», p. 27, y *La Science chinoise et l'Occident*, París Éd. du Seuil, 1973.
21. *Ibídem*.
22. K. Wittfogel, *Le Despotisme oriental*, París, Éditions de Minuit, 1964. Ver igualmente en J. Needham, *La Science chinoise et l'Occident, op. cit.*, el artículo «Science et société à l'Est et à l'Ouest» y, en especial, la crítica de Wittfogel.
23. Una especulación interesante es la de Ursula le Guin, *The Word for World is Forest*, publicado por primera vez en 1972 en *Again, Dangerous Visions*, reimpreso por Berkeley Book, 11ª edición, 1984.
24. André Leroi-Gourhan, *op. cit*.
25. F. Meyer, *La Surchauffe de la croissance*, París, Fayard, 1974.
26. Citado por F. Meyer, *op. cit*.
27. La idea de un fenómeno cósmico que produjese la desaparición de los dinosaurios a finales del Cretáceo fue puesta de relieve por L. W. Alvarez y sus colaboradores (*Science*, 208, 1980, p. 1095). Las correspondientes teorías astronómicas han sido objeto de numerosos artículos, en especial:
M. R. Rampino, R. B. Stothers, «Terrestrial mass extinction, Cometary impacts and the Sun's motion perpendicular to the galactic plane», *Nature*, 308, 1984, p. 709.
R. D. Schwartz, P. B. James, «Periodic mass extinction and the Sun's oscillation about the galactic plane», *Nature* 308, 1984, p. 712.
M. Davis, P. Hut, R. A. Muller, «Extinction of species by periodic comet showers», *Nature*, 318, 1984, p. 715.
W. Alvarez y R. A. Muller, «Evidence from crater ages for periodic impact on earth», Nature 308, 1984, p. 718.

CAPÍTULO IV

1. P. J. Klass, *UFO's explained*, *op. cit.*, 1974.
P. Schaeffer, *The UFO Verdict*, *op. cit.* 1981.
M. Monnerie, *Le Naufrage des extraterrestres*, París, Nouvelles Éditions rationalistes, 1979.
G. Barthel y J. Brucker, *La Grande Peur martienne*, París, Nouvelles Éditions rationalistes, 1979; y la obra clásica:
D. H. Menzel, L. G. Boyd, *The World of Flying Saucers*, *op. cit.*
2. H. Freudenthal, *«LINCOS»: Design of a Language for Cosmic Intercourse*, Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1960.
3. Sagan y Shklovscky (1966) (*op. cit.*) ofrecen el siguiente ejemplo de una lección de «Lincos»:

Capítulo 1. Matemáticas básicas

— Párrafo 1. Una serie de números naturales (la civilización a la escucha de señales no comprende el significado de estos títulos codificados. La comprensión vendrá a través de la descodificación del conjunto del mensaje). La lección consiste en una serie de impulsos de radio no codificados: un impulso, dos impulsos...

— Párrafo 2. Números codificados:

un impulso = 1
dos impulsos = 2
tres impulsos = 3

La civilización a la escucha de «Lincos» aprende el símbolo para la señal «igual» y los números ordinales en «Lincos»; la hipótesis de partida es que una civilización capaz de recibir estas señales también es capaz de descodificarlas. La lección siguiente ayudaría a resolver las dificultades restantes.

— Párrafo 3. Suma:

$1+2=3$
$1+3=4$
$1+4=5$
$2+3=5$

De la misma manera se transmitirían las lecciones sobre la resta, la multiplicación y la división.

Vendrían a continuación toda una serie de conceptos matemáticos tales como «equivalente a», «mayor que», «menor que», «diferente de», «esto es verdadero», «esto es falso», «por ejemplo», «máximo», «mínimo», «crece», «decrece» e incluso la indispensable frase matemática «es fácil de demostrar que». Cada uno de estos conceptos serviría para la descodificación de las lecciones siguientes.

Según Freudenthal, «Lincos» podría transmitir ideas de otro tipo, que caracterizasen la naturaleza humana, tales como «espiritual», «cobarde», «cólera», «altruismo», a partir de síntesis entre personajes imaginarios. Por ejemplo:

Capítulo N. Curso sobre el comportamiento humano.

Tema: diferencias en las aptitudes matemáticas:

A habla a B : ¿Cuántas son $2+3$?
B habla a A : $2+3=5$.

A habla a B : Exacto.

Freudenthal imagina entonces la aparición del personaje C.

A habla a B : ¿Cuántas son 15 × 15?
B habla a A : 15 × 15 = 220
A habla a B : Falso.
A habla a C : ¿Cuántas son 15 × 15?
C habla a A : 15 × 15 = 225.
A habla a C : Exacto.
C es mejor que B.

Los capítulos siguientes, al presentar relaciones más complejas, podrían transmitir conceptos de emoción, de convenciones sociales y de actitudes filosóficas. Paralelamente podrían transmitirse conocimientos de física y de química. La descodificación de una lengua de este tipo, completamente lógica, sería mucho más fácil que el desciframiento efectuado por los arqueólogos de las lenguas antiguas escritas.

4. La falta de interés por la exploración y por la expansión ha existido, desde luego, sobre la Tierra. Los chinos, a pesar de haber inventado el timón de codaste, lo utilizaron muy poco con excepción de una serie de expediciones llevadas a cabo por las flotas chinas a comienzos del siglo XV. Durante menos de medio siglo se comprobó su presencia; luego, de repente, desaparecieron y China volvió a su personalidad agrícola, inclinada hacia el interior (J. Needham, *Scientia*, abril-mayo 1961, reproducido en *La Tradition scientifique chinoise*, *op. cit.*)
5. F. Melia, D. H. Frisch, «Mutual help in SETIs», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 26, 1985, p. 147.
6. P. Connes, *Olbers Paradox revisited and the Future of Intelligence*, SETI conference, Tallin, URSS, 8-11 diciembre 1982.
7. El calamar gigante se estudia en un artículo de D. F. E. Roper y K. J. Boss, *Scientific American*, 246, abril 1982, p. 82.
8. La obra de referencia citada por todos los autores es la de Duke-Elder, *The Eye in Evolution*, Henry Kimpton ed., Londres, 1958.
9. A. Labeyrie, «Standing wave and pellicle: a possible approach to very large space telescopes», *Astronomy and Astrophysics*, 77, L1-L2, 1979.
10. N. S. Kardashev, «Transmission of information by extraterrestrial civilizations», *Soviet Astronomy*, vol. 8, n.º 2, 1964, p. 217-221, imagina tres tipos de civilizaciones según manejen toda la energía producida en la Tierra (Kardashev I), una potencia idéntica a la irradiada por el Sol (Kardashev II) o idéntica a la energía irradiada por una galaxia (Kardashev III).
11. S. von Hoerner, «Population explosion and interstellar communications», *National Radio Astronomical Observatory*, Green Bank, West Virginia, Reprint Series B, 1973, p. 380.
12. Ver nota 4.
13. W. I. Newman, C. Sagan, «Galactic civilizations: population dynamics and interstellar diffussion», *Icarus*, 46, 1981, p. 293.
W. I. Newman, C. Sagan, «The solipsist approach to extraterrestrial intelligence», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 1983, p. 24-113.
14. S. J. Gould, «La non-science de la nature humaine», en *Darwin et les Grandes Énigmes de la Vie*, París, Éd. du Seuil, 1984, p. 256.
15. F. J. Tipler, «Extraterrestrial intelligent beings do not exist», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 21, 1980, p. 267.
W. I. Newman y C. Sagan, *op. cit.* cf. nota 13.

16. J. von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automats*, editada y completada por A. W. Burks, Urbana, University of Illinois Press, 1966.
17. Arbib, en *Interstellar Communications*, C. Ponnamperuma y A. G. W. Cameron ed. *op. cit.*, p. 59.
18. F. J. Tipler «Extraterrestrial intelligent beings do not exist», *op. cit.*
19. Debo la expresión a J.-P-Vernant.
20. S. J. Gould, *op. cit.*, p. 375.
21. En *Physics Today*, marzo 1982, «The readers respond to Tipler», p. 26, y en especial F. D. Drake, p. 26 y F. J. Tipler, p. 34.
22. W. I. Newman, C. Sagan «Galactic civilizations: population dynamics and interstellar diffusion», *op. cit.*
23. G. D. Brin, «The great silence: the controversy concerning extraterrestrial intelligent life», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 24, 1983, p. 283.
24. H. Nadj, M. Nadj, en «The readers respond to Tipler», *Physics Today*, marzo 1982, p. 82.
25. R. J. Mc. Eliece, «The reliability of computor memories», *Scientific American*, 252, enero 1985, p. 68.
26. G. D. Brin, «The great silence: the controversy concerning extraterrestrial intelligent life», *op. cit.*
27. Y. Coury, «Le darwinisme social existe-t-il?», *Raison présente*, n.º 66, 1983, p. 17.
28. M. D. Papagiannis, «Natural selection of stellar civilizations by the limit of Growth», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 25, 1984, p. 309.
29. B. Carter, «Large numbers coïncidences and the anthropic principle in cosmology», *Confrontation of Cosmological Theories with Observationnal Data*, M. S. Longair ed., Reidel Dordrecht, 1974.
30. Citado por S. J. Gould, *op. cit.*, p. 365.
31. H. G. Wells, *A Modern Utopia*, 1905, reeditado por University of Nebraska Press, 1967.

NOTA FINAL

1. La hipótesis del zoo se encuentra reproducida en Newman y Sagan, *op. cit.*: «ellos» nos observan sin intervenir, como nosotros observamos a los animales salvajes. Pero, como hace notar P. Connes, no hay reserva de caza sin cazador furtivo. Es difícil creer que todas las civilizaciones extraterrestres se hayan puesto de acuerdo para colocarnos en plan de observación zoológica. Desde un punto de vista estrictamente lógico, este argumento deja de ser válido si no existe más que *una sola* civilización extraterrestre.
En lo que se refiere a las aplicaciones de la ausencia de contactos, es preciso añadir cierto número de especulaciones que ponen en tela de juicio al propio concepto de civilización, imaginando especies vivientes que manifiesten una interacción con el entorno diferente de la que tenemos nosotros. En la Tierra existen insectos que intercambian información a través de compuestos químicos, las feromonas, o peces que se comunican por medio de campos eléctricos. No obstante, ¿no es, en definitiva, por la elaboración de una *representación del mundo* como se edifica una civilización? Poco importa el modo de constitución de la información; la idea de otra concepción del mundo parece apoyarse en una sutil

forma de rechazo de la realidad objetiva, una especie de resurrección de la epistemología de Mach. De manera deliberada ha descartado una discusión de estos puntos de vista.

APÉNDICES

A1

1. E. Schatzman, «Recherche et détection des neutrinos solaires», *Revue du Palais de la Découverte*, 1985.

A2

1. E. Schatzman, *Origine et Évolution des mondes*, París, Albin Michel, 1957.
2. Peebles, *Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1970.

29. **Sol, lunas y planetas.** Erhard Keppler
30. **Los secretos de una casa.** *El mundo oculto del hogar.* David Bodanis
31. **La cuarta dimensión.** *Hacia una geometría más real.* Rudy Rucker
32. **El segundo planeta.** *El problema del aumento de la población mundial.* U. Colombo y G. Turani
33. **La mente (I).** Anthony Smith
34. **La mente (II).** Anthony Smith
35. **Introducción a la química.** Hazel Rossotti
36. **El envejecimiento.** David P. Barash
37. **Edison.** Fritz Vögtle
38. **La inestable Tierra.** *Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales.* Basil Booth y Frank Fitch
39. **Gorilas en la niebla.** *13 años viviendo entre los gorilas.* Dian Fossey
40. **El espejo turbulento.** *Los enigmas del caos y el orden.* John Briggs y F. David Peat
41. **El momento de la creación.** *Del Big Bang hasta el Universo actual.* James S. Trefil
42. **Dios y la nueva física.** Paul Davies
43. **Evolución.** *Teorías sobre la evolución de las especies.* Wolfgang Schwoerbel
44. **La enfermedad, hoy.** Lluís Daufí
45. **Iniciación a la meteorología.** Mariano Medina
46. **Los niños de Urania.** *En busca de las civilizaciones extraterrestres.* Evry Schatzman



¿Estamos solos en el Universo? ¿Hay en otra parte de la Galaxia seres vivos pensantes? Durante mucho tiempo las respuestas a estas preguntas han sido el soporte argumental de libros y películas de ciencia ficción. Sin embargo, en la actualidad ocupan y preocupan a la mayoría de las disciplinas científicas. Hoy día, y gracias a la universidad de las leyes de la naturaleza y del progreso en las teorías de la evolución, todo parece indicar que el origen de la vida pensante no es un hecho excepcional y aislado.
Al mismo tiempo que la ciencia nos permite creer en la existencia de vecinos cósmicos, nuestras modernas técnicas están haciendo lo imposible para que entremos en contacto con ellos.
La lectura de este libro nos sitúa dentro del mundo de los extraterrestres y responde a muchas de las preguntas que diariamente nos hacemos.

Evry Schatzman es director del CNRS (Centro Nacional de Investigación Científica de París) y fundador de la escuela de astrofísica francesa. Sus numerosos e importantes trabajos científicos le han valido una gran reputación internacional. Además es miembro de la Academia Francesa de las Ciencias.

Los niños de Urania E. Schatzman

46





Los niños de Urania

En busca de las civilizaciones extraterrestres

Evry Schatzman

Biblioteca Científica Salvat